

# SUCHE NACH DUNKLEN PHOTONEN AN MAMI

Harald Merkel

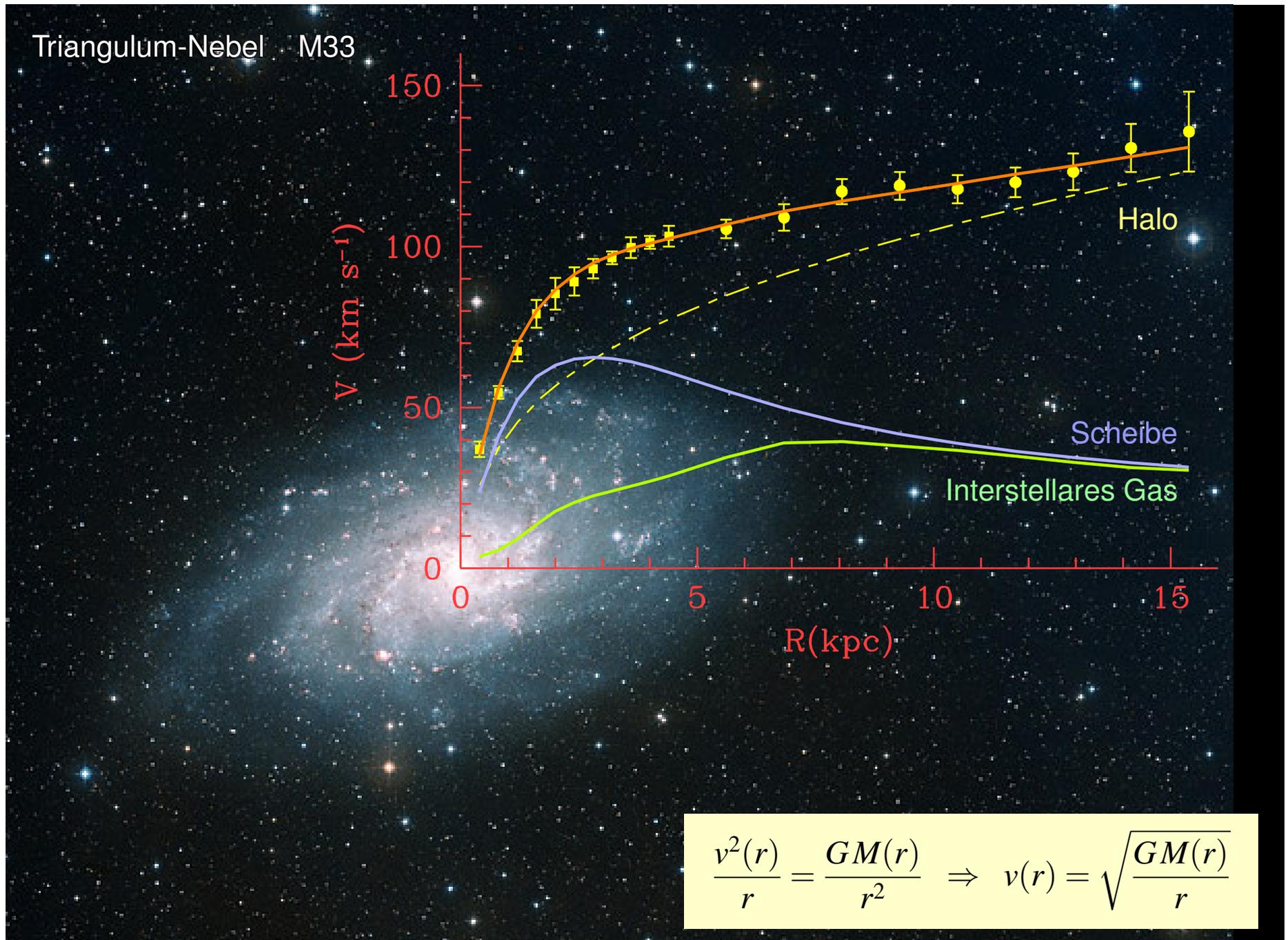
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Frühjahrstagung der DPG

Dresden, 8. März 2013

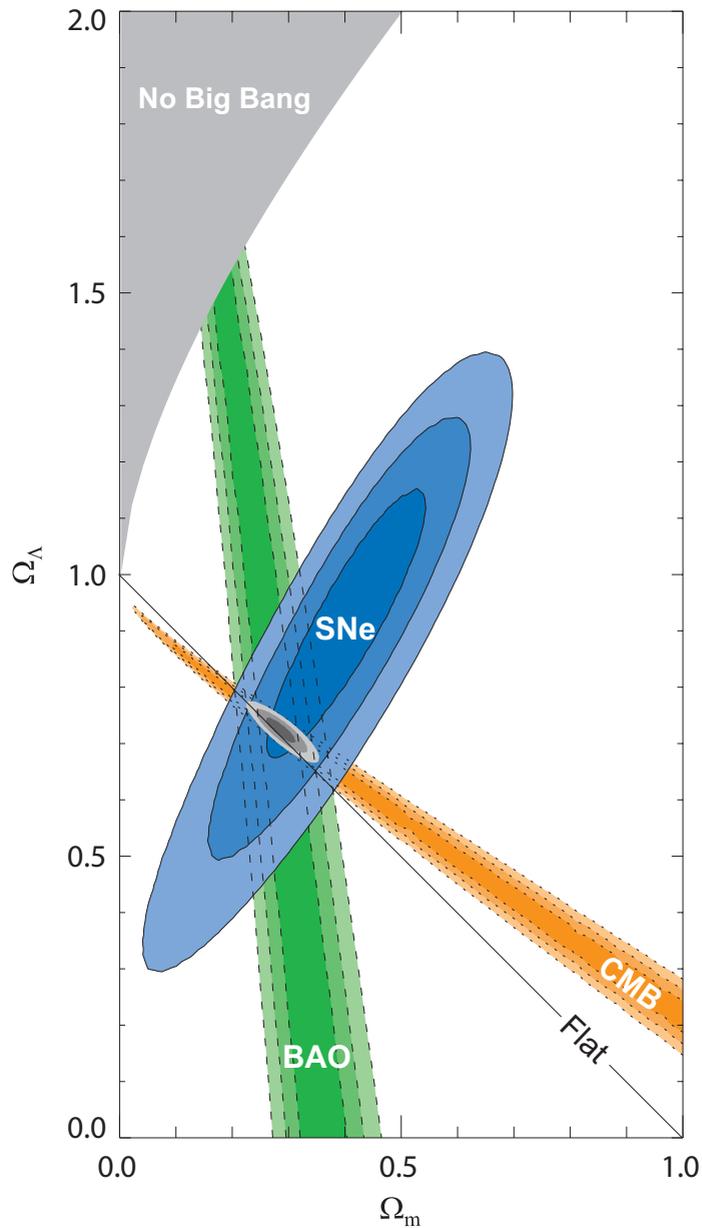
- Motivation
  - ▶ Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells
  - ▶ Kandidaten aus der Teilchenphysik
  - ▶ Das  $\gamma'$ -Boson
- Wie können wir ein „dunkles Photon“ messen?
  - ▶ Di-Lepton-Produktion
  - ▶ Wirkungsquerschnitte
- Experimente am Mainzer Mikrotron (MAMI)
  - ▶ Experimente
  - ▶ Ergebnisse
- Experimentelles Programm an MAMI und anderen Beschleunigern
- Zusammenfassung

# Rotationskurven der Galaxien



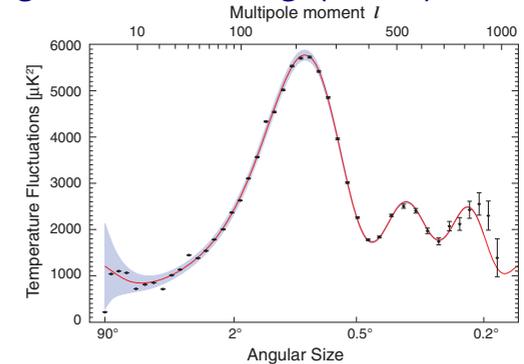
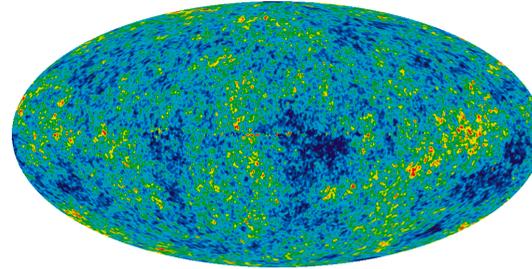
F. Zwicky, ApJ, 86 (1937) 217, E. Corbelli, P. Salucci, MNRAS 311 (2002), 441 – 447

# Dunkle Materie in der Kosmologie

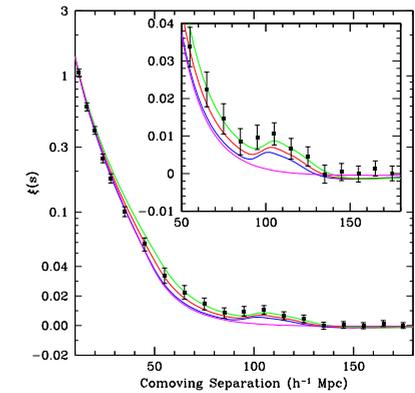
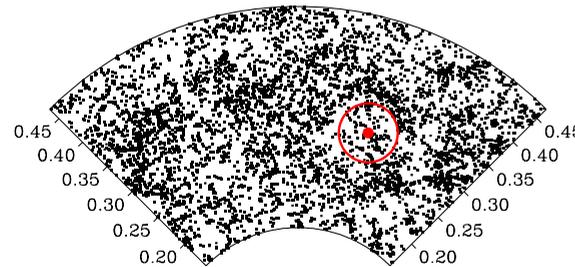


● Supernova Typ Ia (SNe)

● Kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB)

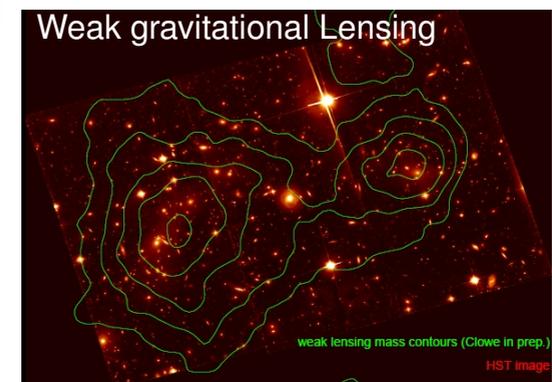
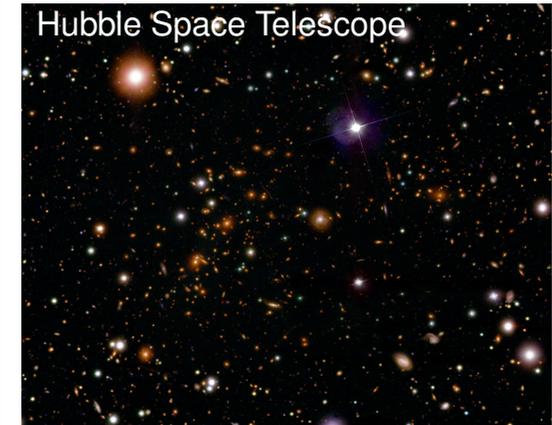
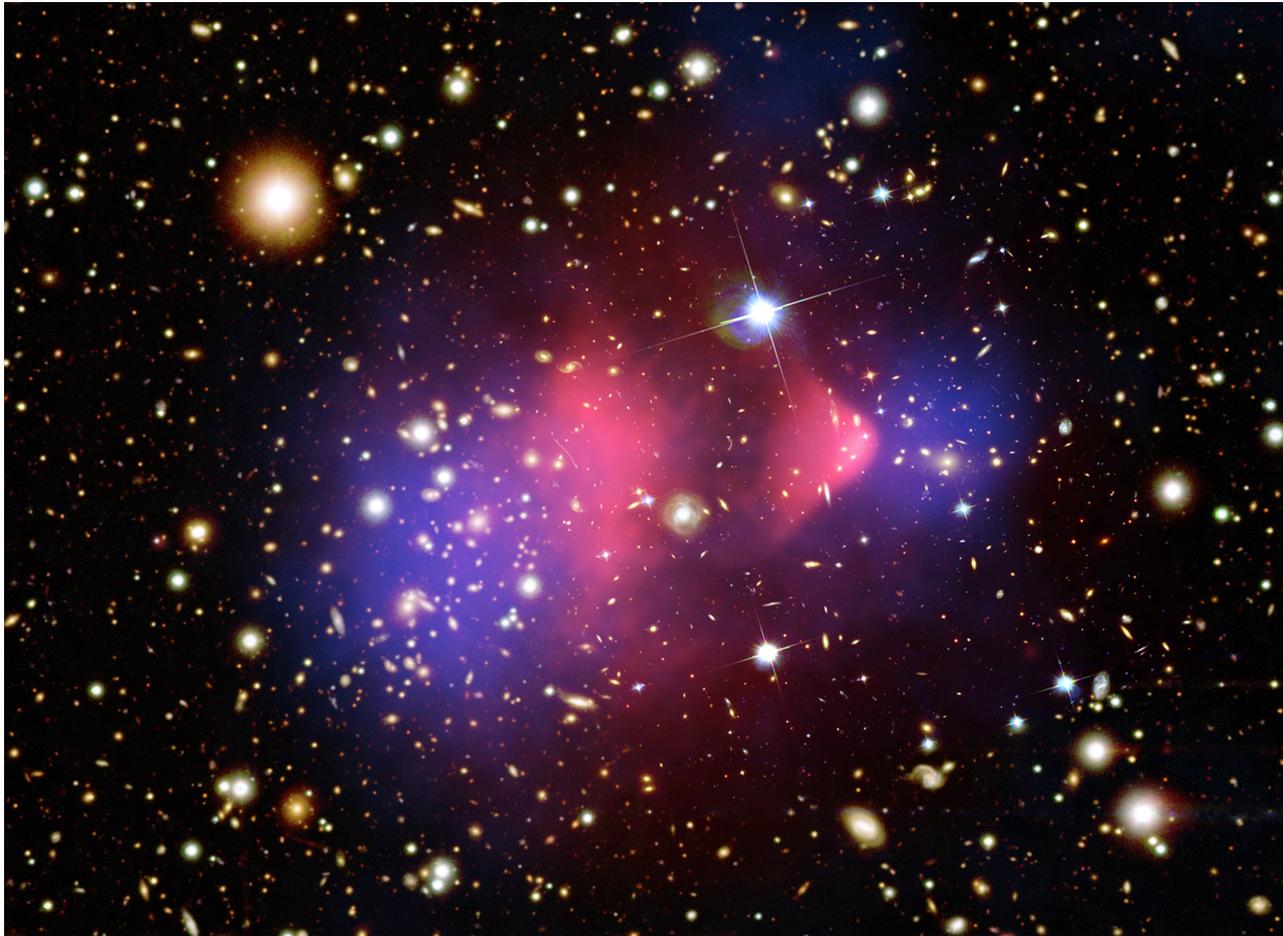


● Baryon akustische Oszillationen (BAO)



$\Rightarrow \quad \Omega_\Lambda = 74\% \quad \text{Dunkle Energie}$   
 $\Omega_{\text{CDM}} = 21\% \quad \text{Kalte dunkle Materie}$   
 $\Omega_b = 4\% \quad \text{Baryonische Materie}$

# Galaxien-Cluster 1E 0657-56 „Bullet-Cluster“



- Sichtbares Licht: Sterne (keine Kollision)
- Röntgenbereich: Intergalaktisches Gas (EM-Schockwellen)
- Gravitationslinsen: Massenverteilung (Keine Kollision!!!)

⇒ Sichtbare Masse bleibt hinter Gesamtmasse zurück

# Kandidaten für dunkle Materie aus der Teilchenphysik

---

## Steckbrief:

- Massiv
- Langsam (kalt)
- „Fast“ keine Wechselwirkung mit Materie des Standardmodells
- Erzeugung im Urknall

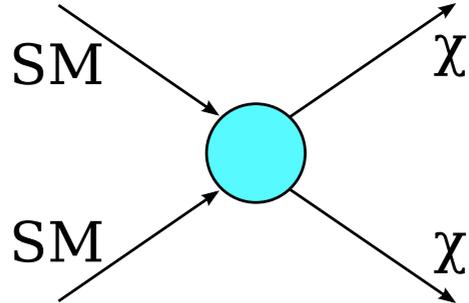
## Kandidaten:

- Baryonische dunkle Materie, Gas-Wolken, schwarze Löcher, MACHOs
  - ⚡ Primordial Nukleosynthese, Erfolglose Suche
- Heiße dunkle Materie, z.B. Neutrinos
  - ⚡ Strukturformation
- Kalte dunkle Materie
  - ▶ WIMPs: Weakly Interacting Massive Particles?
  - ▶ Axion?
  - ▶ Leichtestes Supersymmetrisches Teilchen (LSP)?
  - ▶ Neutralino, Sneutrino, Gravitino, Axino,...?

⇒ Hypothese: unbekannte Teilchen bilden dunkle Materie

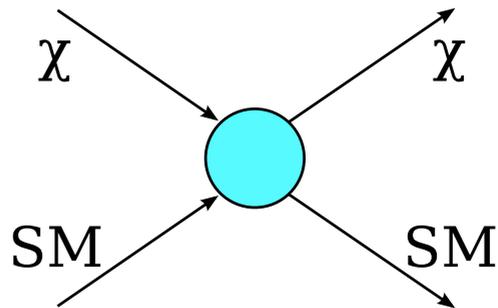
# Konventionelle Strategien für die Suche nach dunkler Materie

---



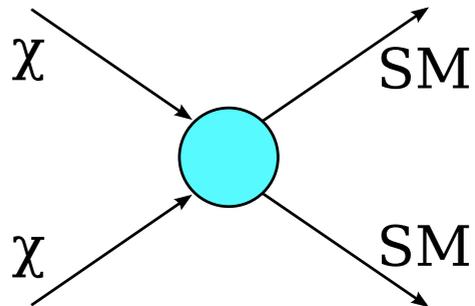
Direkte Produktion:

LHC



Direkte Suche:

CDMS, DAMA/LIBRA,  
XENON, CRESST, LUX,  
COUPP, KIMS, ...



Indirekte Suche:

PAMELA, Fermi, HESS,  
ATIC, WMAP, ...

# Der Bottom-up-Ansatz: Suche nach der Wechselwirkung

---

## Annahmen:

- Es gibt dunkle Materie (SUSY oder etwas anderes)
- Mehr als EIN Teilchen der dunklen Materie  
⇒ dunkler Sektor
- Dunkle Materie hat eine Restwechselwirkung mit Standard-Modell-Materie (außer Gravitation)
- Dunkle Materie wechselwirkt mittels einer „dunklen Kraft“

## Frage:

- Wie ist der Charakter der „dunklen Kraft“?
- Skalare, pseudo-skalare, oder Vektor-Bosonen?
- Massiv oder masselos? In welchem Massebereich?
- Wie groß ist die Kopplungskonstante?



# Oder Top-down-Motivation...

---

Wie „konstruiert“ man Erweiterungen des Standardmodells?

1. Neue Symmetrie-Gruppen
2. Symmetriebrechung, so dass Standardmodell eine gute Näherung bleibt!

Konsequenzen:

- Zusätzliche  $U(1)$ -Eichbosonen treten fast automatisch auf:
  - ▶ Große Eichgruppen müssen gebrochen werden
  - ▶  $U(1)$  sind lokale Symmetrien mit niedrigstem Rang
- $U(1)$ -Eichbosonen können versteckt sein (keine WW mit SM)
- Beispiel:  $U(1)$ -Eichbosonen bei der String-Kompaktifizierung:

$$E_8 \times E_8 \rightarrow E_6 \times E_8 \rightarrow \underbrace{SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y}_{\text{standard model}} \times U(1)_{\text{hidden}}$$

durch spontane Brechung von  $E_8$

- Es gibt keinen Grund, dass  $U(1)$  Bosonen sehr schwer sind!

# Kinetische Mischung

---

Dunkle Materie koppelt an  $U(1)$ -Boson

Mischung zwischen  $\gamma$  und  $\gamma'$  über kinetischen Term

$$\mathcal{L} = \dots + -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^{\text{SM}}F_{\text{SM}}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}^{\text{hidden}}F_{\text{hidden}}^{\mu\nu} + \frac{\epsilon}{2}F_{\mu\nu}^{\text{SM}}F_{\text{hidden}}^{\mu\nu} + m_{\gamma'}^2 A_{\mu}^{\text{hidden}}A_{\text{hidden}}^{\mu}$$

- Renormierung der Ladung:

⇒ Mischung Standard-Modell-Ladung — „dunkle“ Ladung

- Mischungs-Parameter  $\epsilon$  der  $\gamma'/\gamma$  Mischung

- Boson-Masse  $m_{\gamma'} > 0 \Rightarrow$   
Zerfall ist unterdrückt, makroskopische Lebenszeit

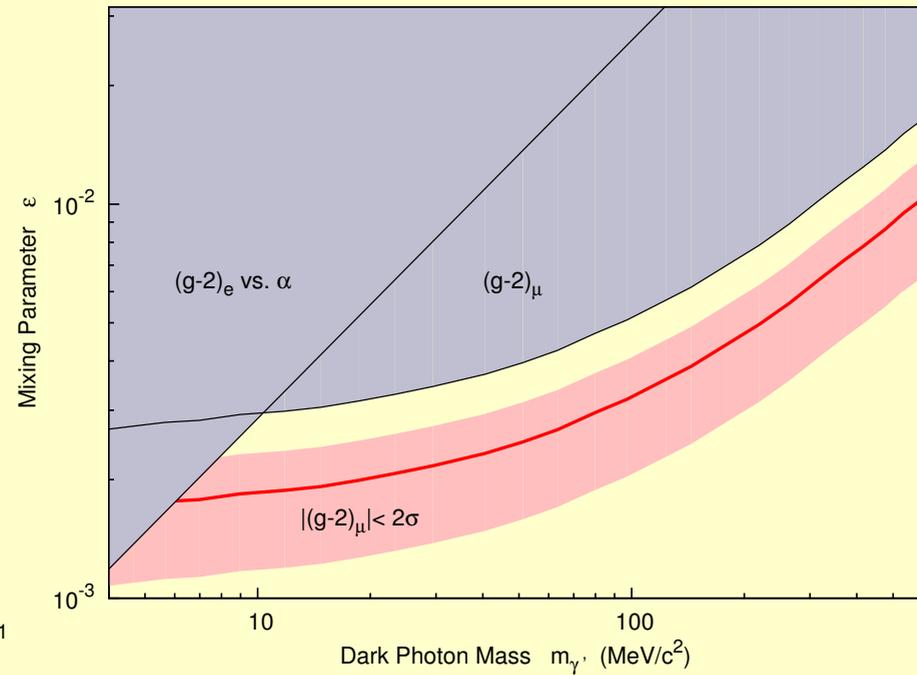
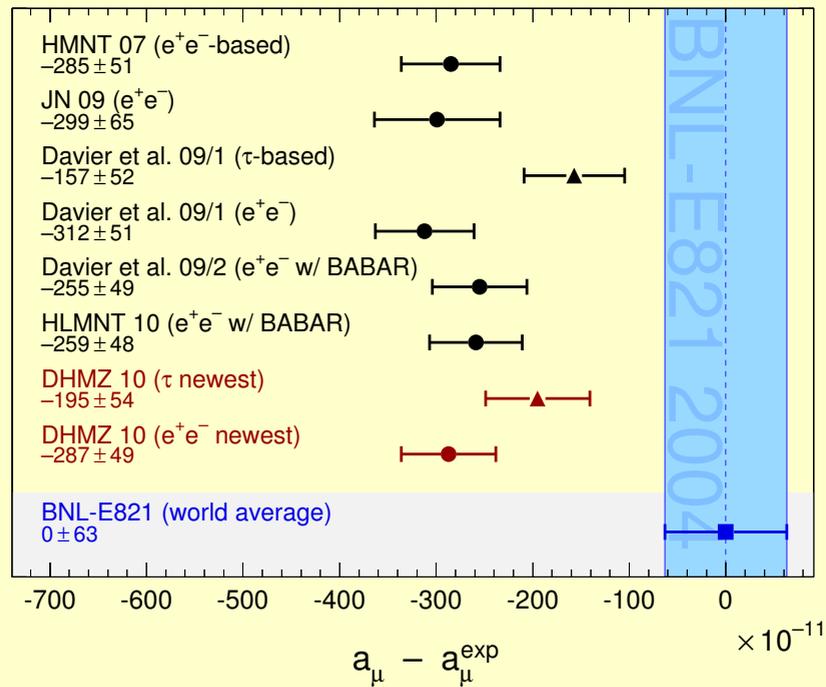
⇒ Suche nach  $\chi$  bei hohen Energien

ODER

Suche nach  $\gamma'$  bei niedrigen Energien!

Gibt es experimentelle Hinweise?

# Anormales magnetisches Moment des Muons



- Präzisionsmessung von  $(g - 2)$  des Muons am BNL
- Signifikante Diskrepanz mit Rechnungen des Standardmodells
- Mögliche Erklärung: **Zusätzliches  $U(1)$ -Boson  $\gamma'$**

G. W. Bennet *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006)

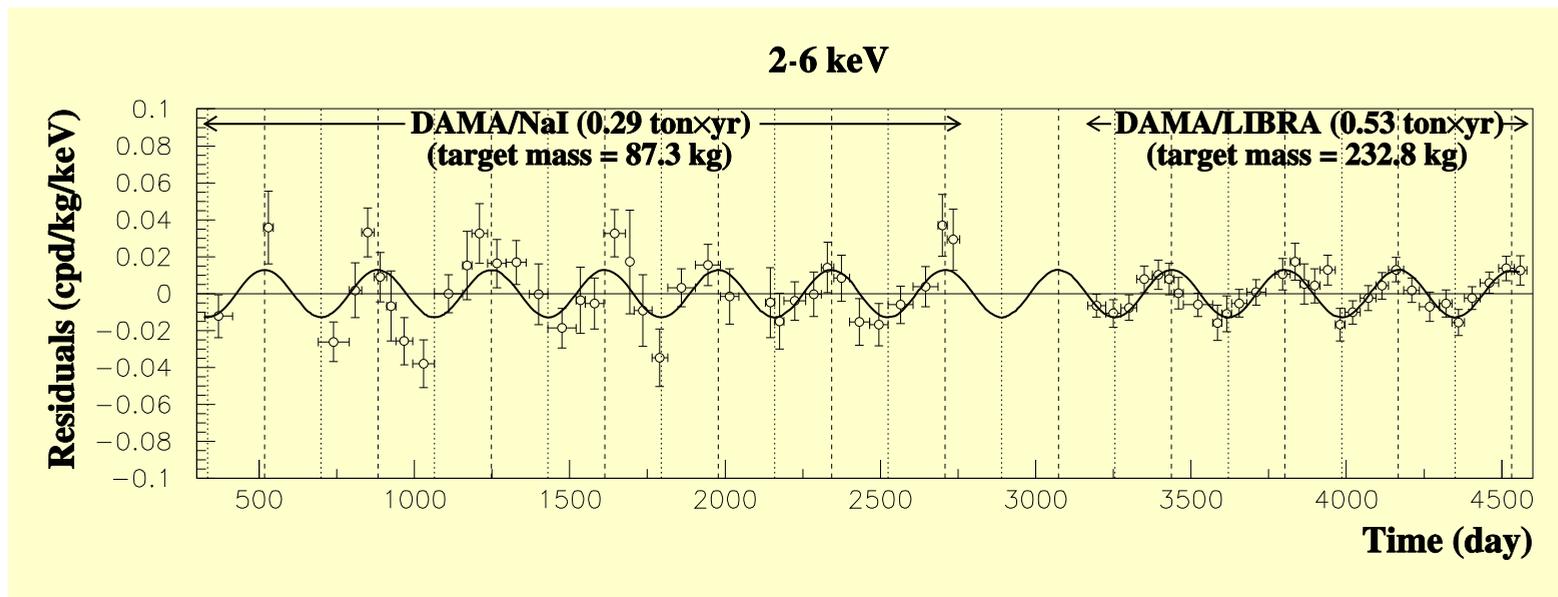
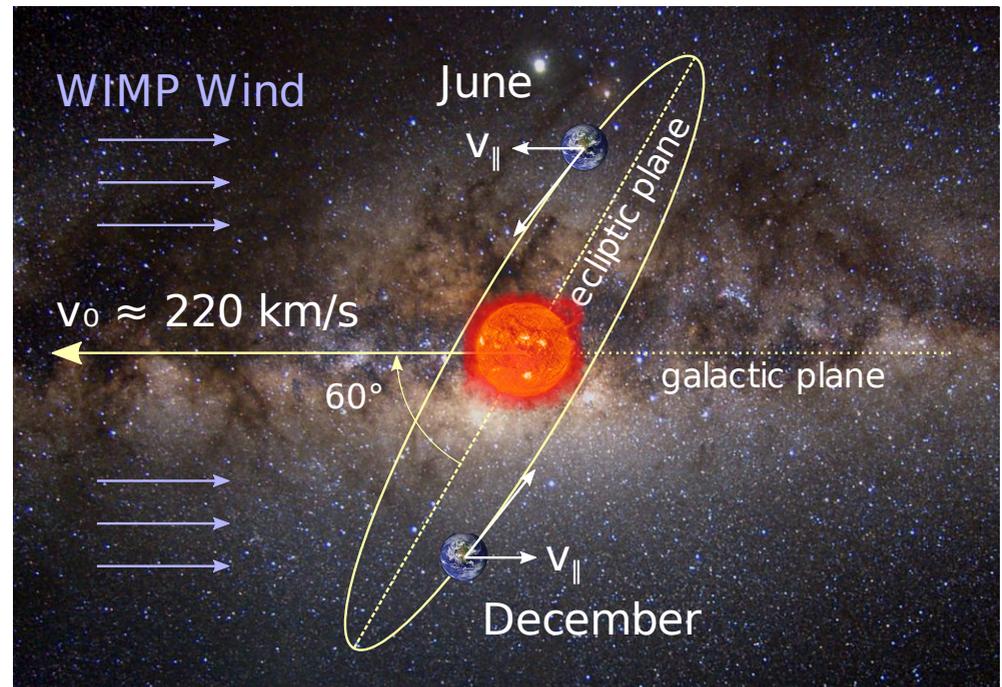
M. Pospelov, Phys. Rev. D 80, 095002 (2009)

# DAMA/NaI und DAMA/LIBRA

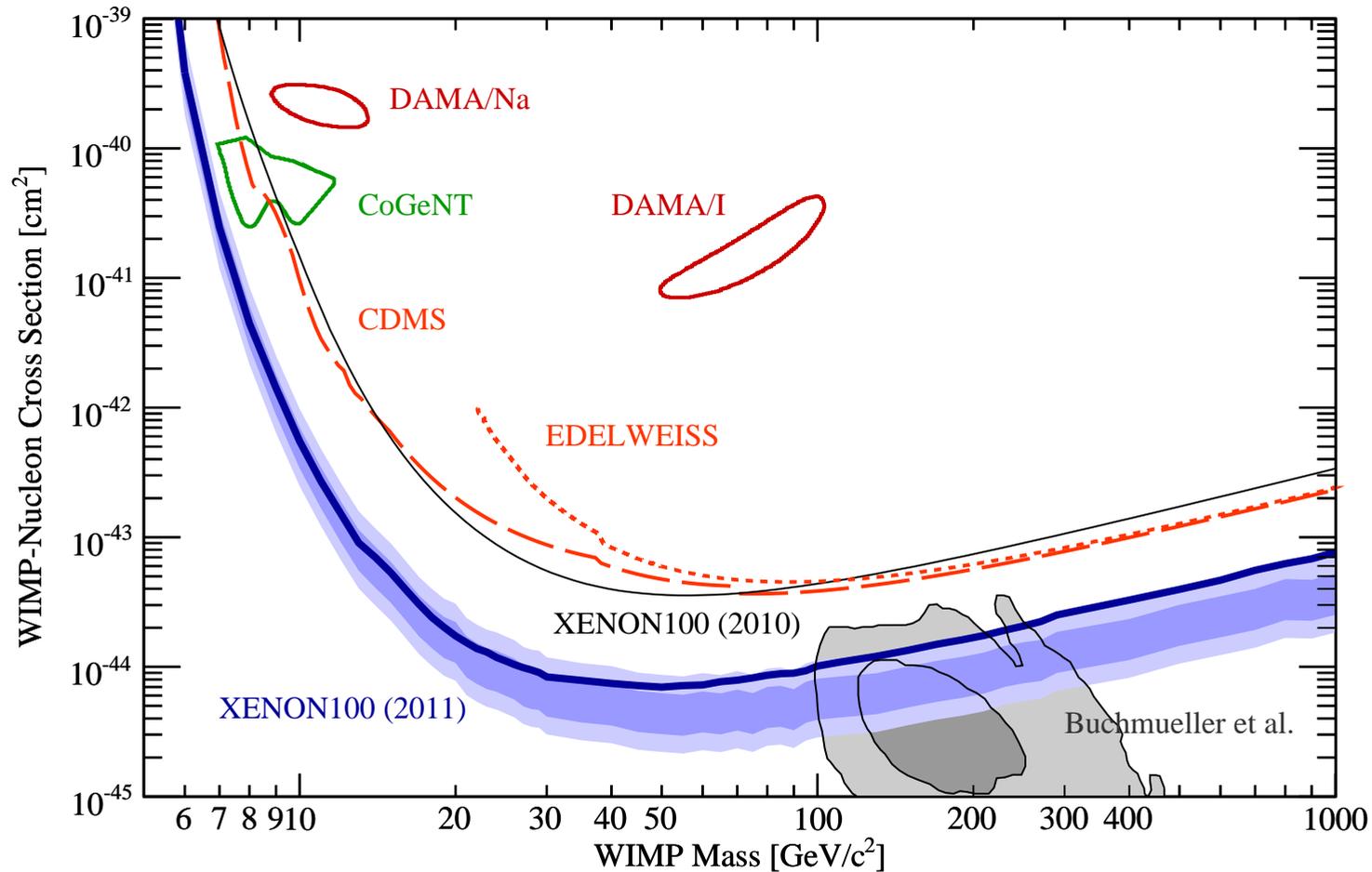
- NaI-Detektor im Gran-Sasso-Massiv
- Elastische Streuung  $\chi + N \rightarrow \chi + N$
- Modulation:

$$S_0 + A \cos \omega(t - t_0)$$

- Erwartete Phase: 2. Juni ( $t_0 = 152$ )
- $8.2\sigma$  Signal mit  $t_0 = 144 \pm 8$

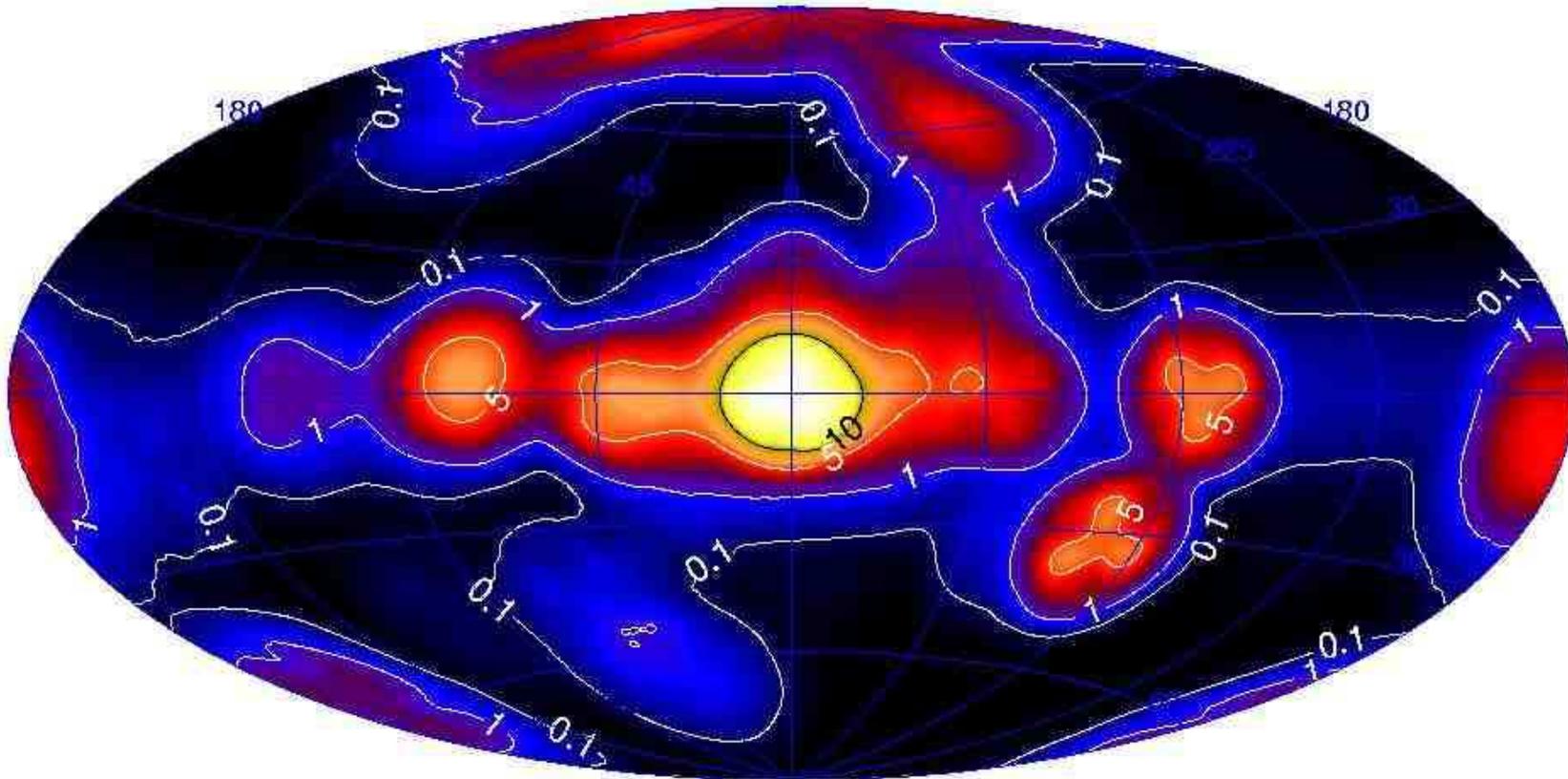
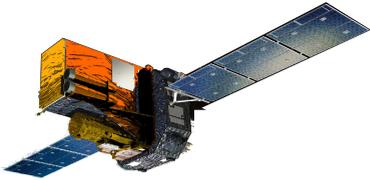


# Problem: DAMA/LIBRA und die anderen...



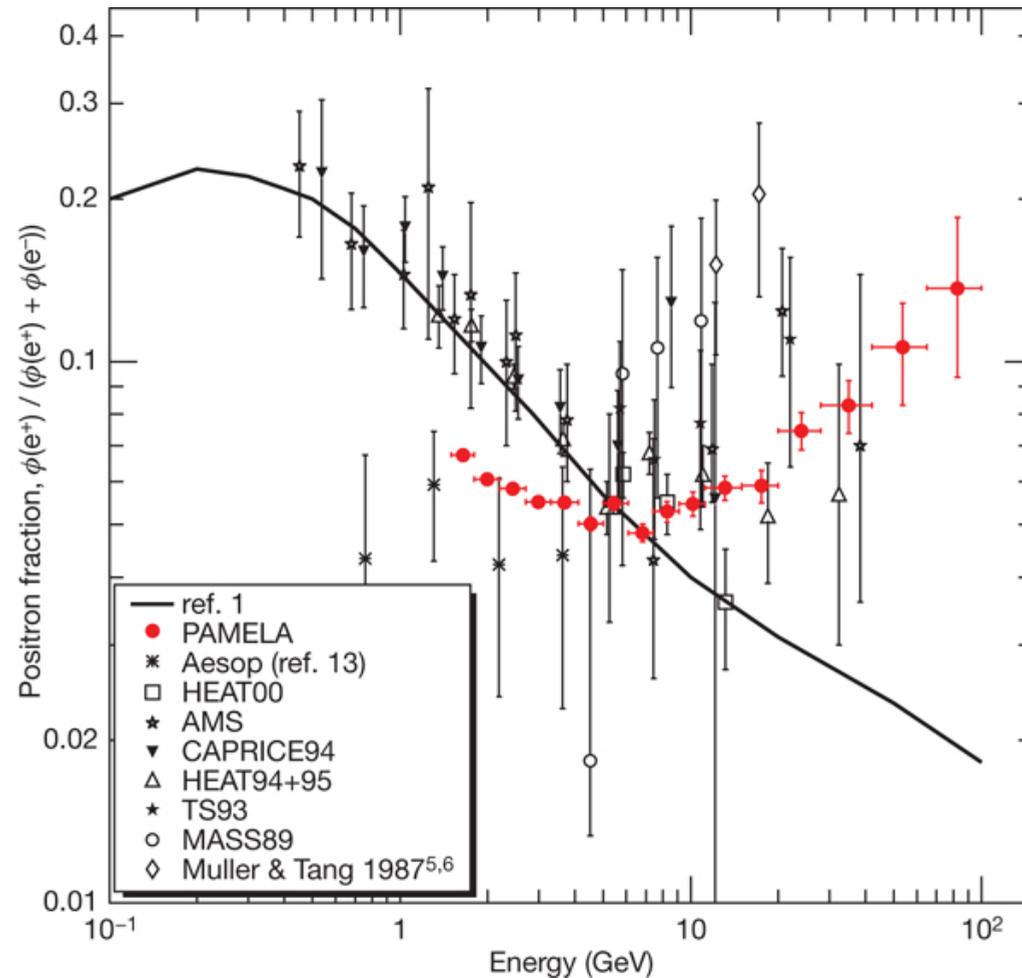
- Signale mit jahreszeitlicher Modulation DAMA und CoGeNT?
- XENON100, CDMS: Koinzidenzexperimente
- ⇒ Mögliche Erklärung: **Reaktionsmechanismus (Elektronen, angeregte DM)**

# SPI Spektrometer/INTEGRAL: 511 keV $\gamma$ -Strahlung



⇒ Positronen aus der Annihilation  $e^+ + e^-$

# PAMELA: Positron-Überschuss

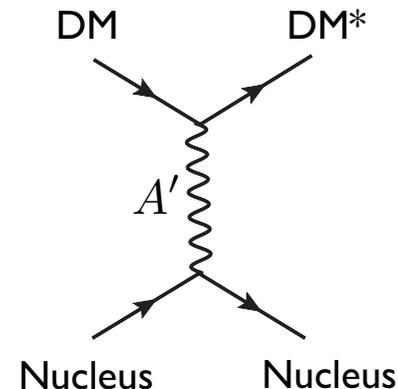
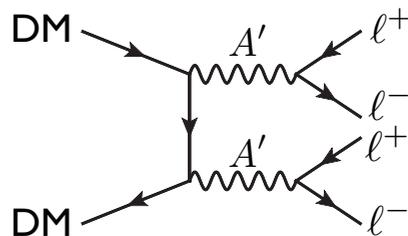


⇒ Überschuss von Positronen für  $E > 10 \text{ GeV}$

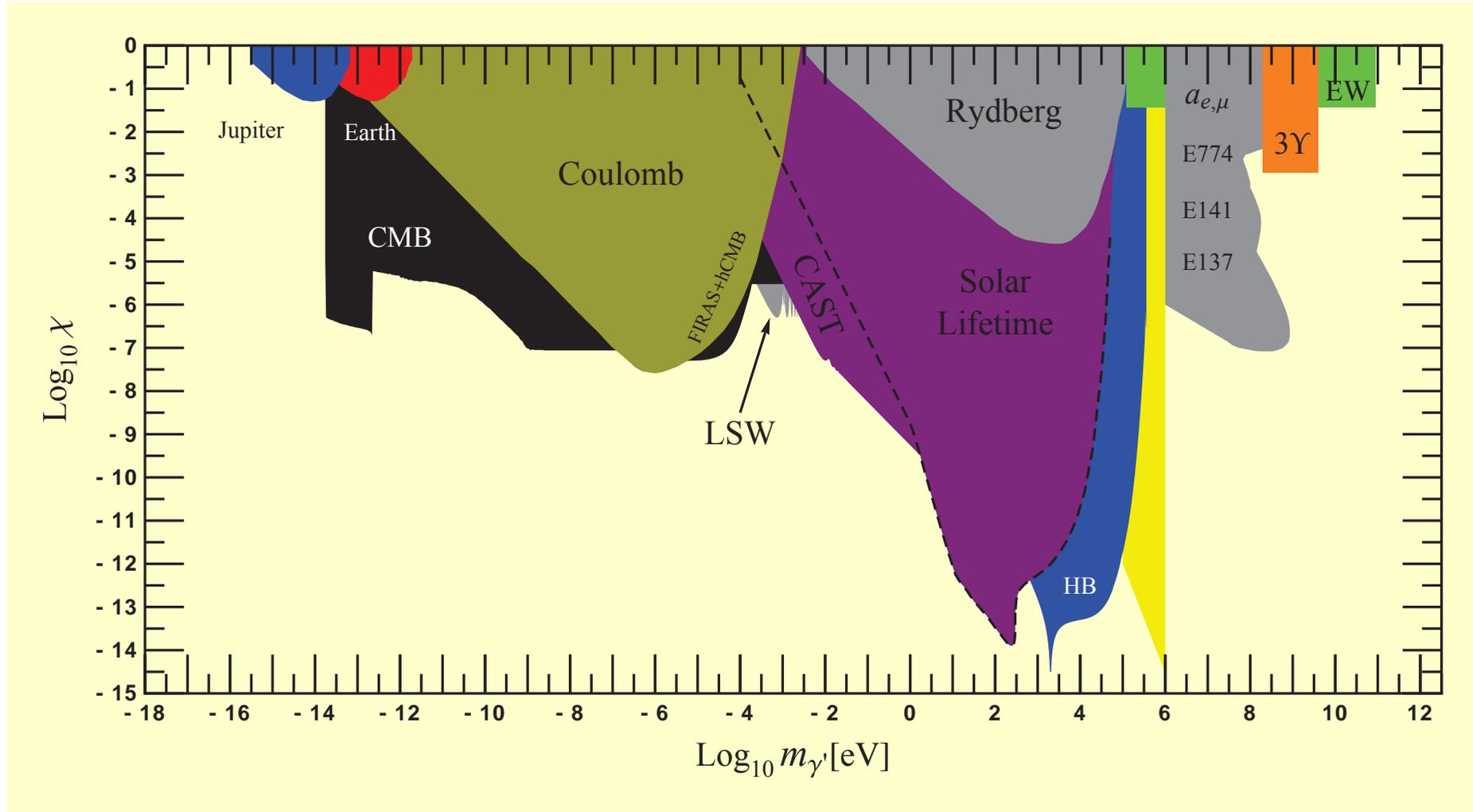
# Das $\gamma'$ -Boson (oder $A'$ , $\phi$ , ...)

- $g - 2$  des Muons
- Direkte Streuung  $\Rightarrow$  DAMA/LIBRA-Modulation
- Positronenüberschuss, aber keine Anti-Protonenüberschuss (PAMELA, INTEGRAL 511 keV-Linie, etc. )
  - $\Rightarrow$  Großer Annihilationswirkungsquerschnitt
- ABER: Vorkommen der DM in Kosmologie erfordert niedrigen WQ
  - $\Rightarrow$  Sommerfeld-Enhancement des Wirkungsquerschnitts für geringe Geschwindigkeiten
    - ▶ großer WQ für Zerfall in Leptonen
    - ▶ kleiner WQ für Zerfall in Hadronen

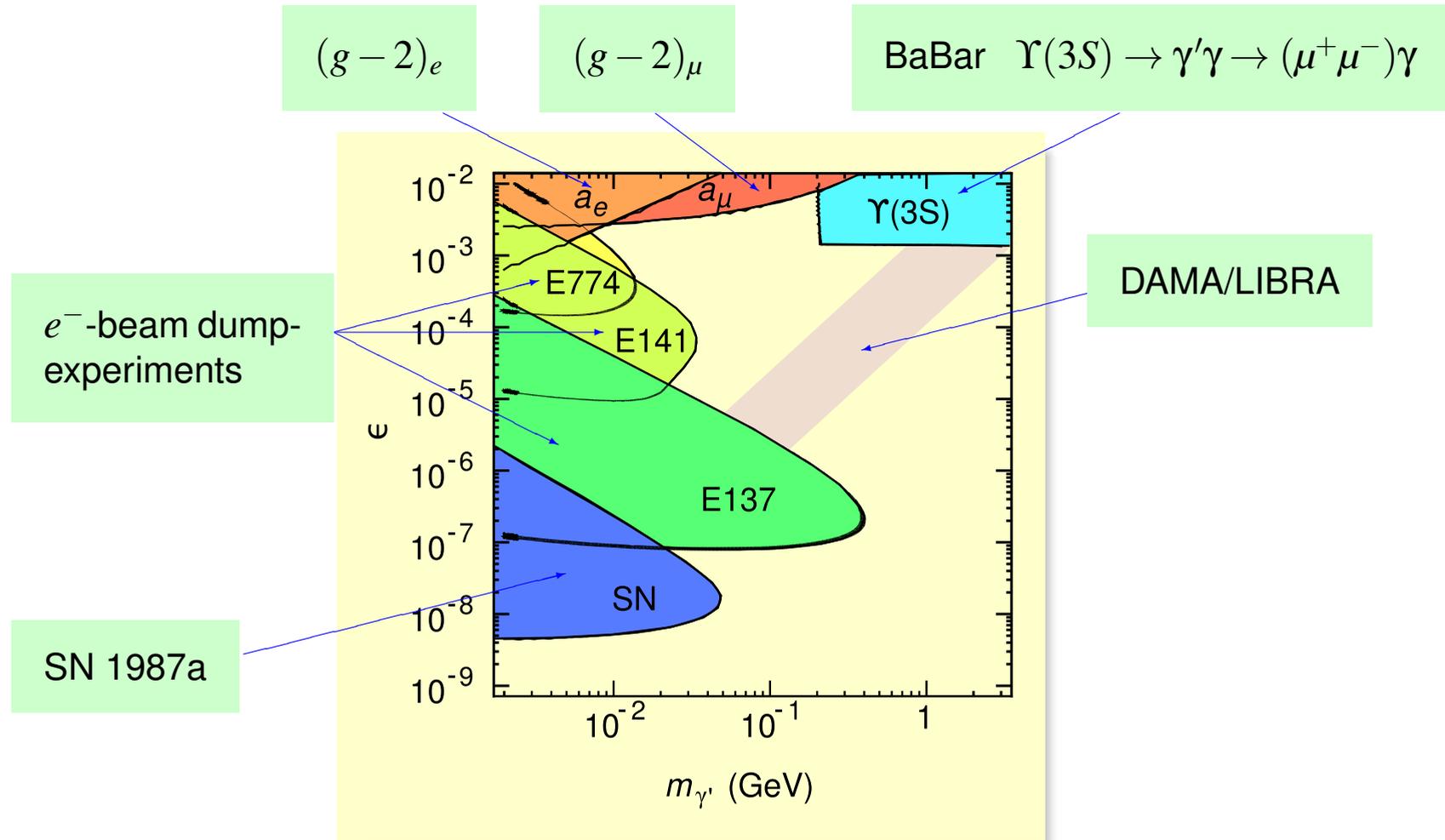
$\Rightarrow U(1)$ -Vektorboson  $\gamma'$  mit Mass im GeV-Bereich



# Existierende Grenzen für dunkle Photonen



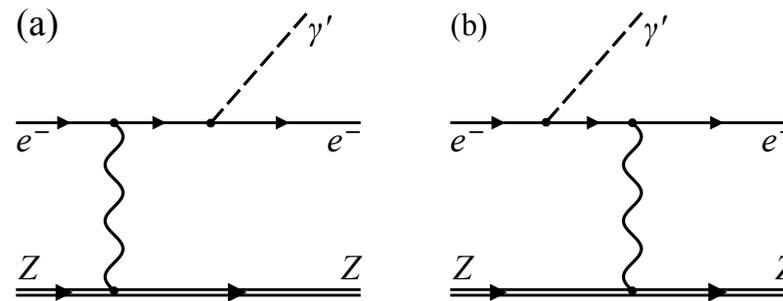
# Parameter-Bereich für Masse und Mischungsparameter des $\gamma'$ -Bosons



- Interessanter Bereich:  $10^{-8} < \epsilon < 10^{-2}$        $10\text{MeV} < m_{\gamma'} < 1000\text{MeV}$
- Energiebereich von MAMI!

# Messprinzip

# Quasi-Photoproduktion an schweren Targetkernen



Weizsäcker-Williams-Näherung:

$$\frac{d\sigma}{dx d\cos\theta_{\gamma'}} \approx \frac{8Z^2 \alpha^3 \varepsilon^2 E_0^2 x}{U^2} \tilde{\chi} \left[ \left(1 - x + \frac{x^2}{2}\right) - \frac{x(1-x)m_{\gamma'}^2 (E_0^2 x \theta_{\gamma'}^2)}{U^2} \right]$$

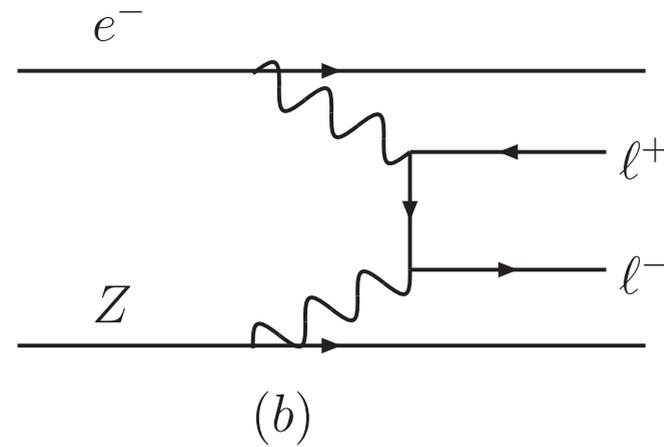
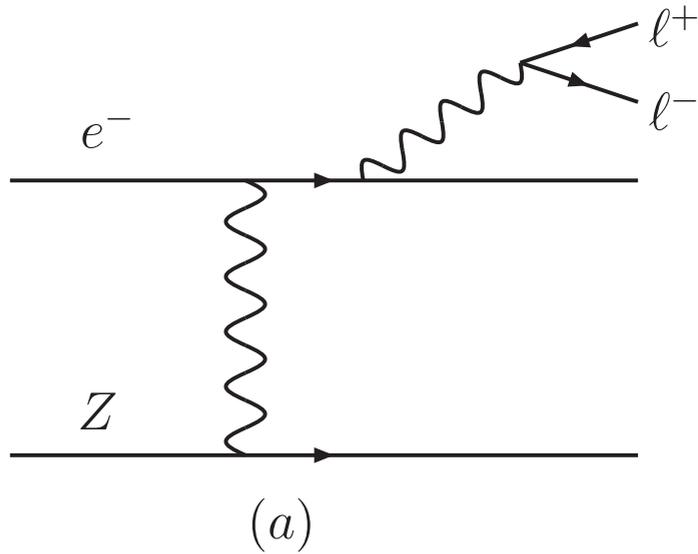
mit  $x = \frac{E_{\gamma'}}{E_0}$

$$U(x, \theta_{\gamma'}) = E_0^2 x \theta_{\gamma'}^2 + m_{\gamma'}^2 \frac{1-x}{x} + m_e^2 x$$

Lebensdauer:

$$\gamma c \tau \sim 1 \text{ mm} \left(\frac{\gamma}{10}\right) \left(\frac{10^{-4}}{\varepsilon}\right)^2 \left(\frac{100 \text{ MeV}}{m_{\gamma'}}\right)$$

# Untergrund (!)

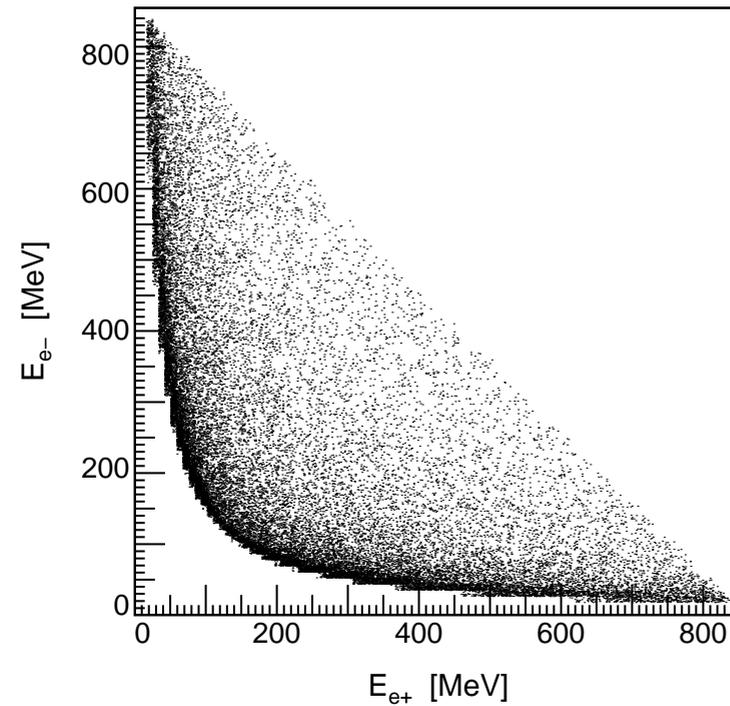
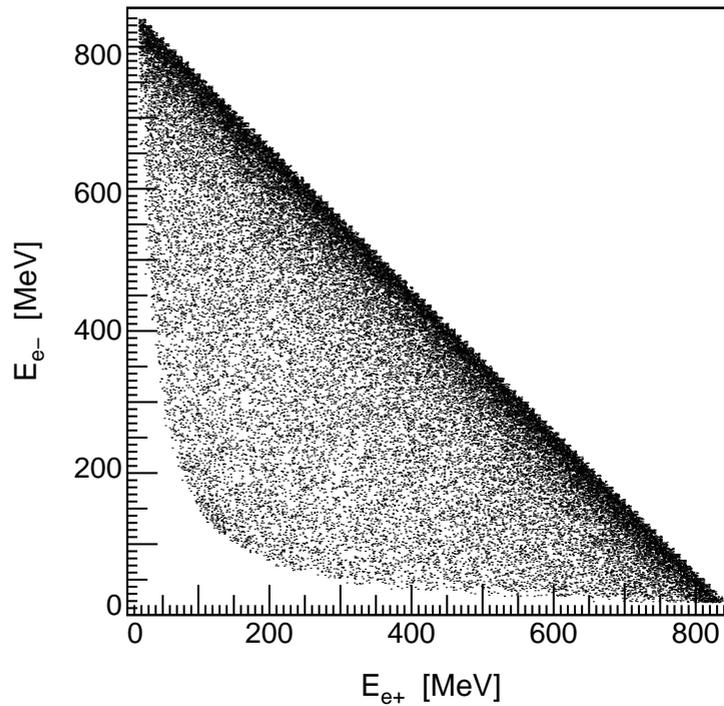
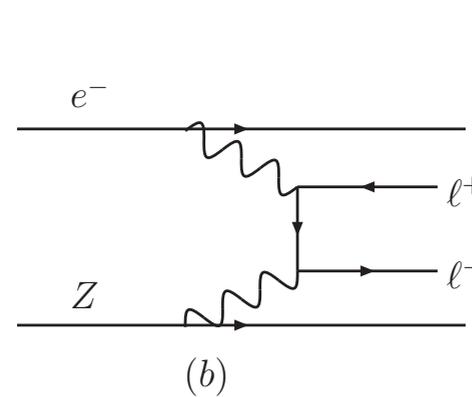
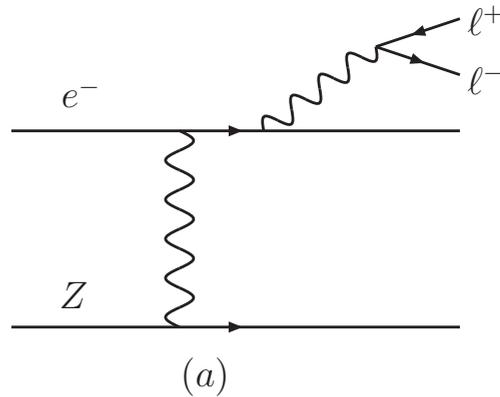


- Virtuelles Photon anstelle von  $\gamma'$
- Exakt berechenbar (nur QED)
- Gleicher Verlauf wie Wirkungsquerschnitt der Produktion
- $\Rightarrow$  Nicht separierbar

- Exakt berechenbar (nur QED)
- Peak für  $l^*$  auf der Massenschale
- Energieübertrag auf  $l^-$  oder  $l^+$
- $\Rightarrow$  Kinematische reduzierbar

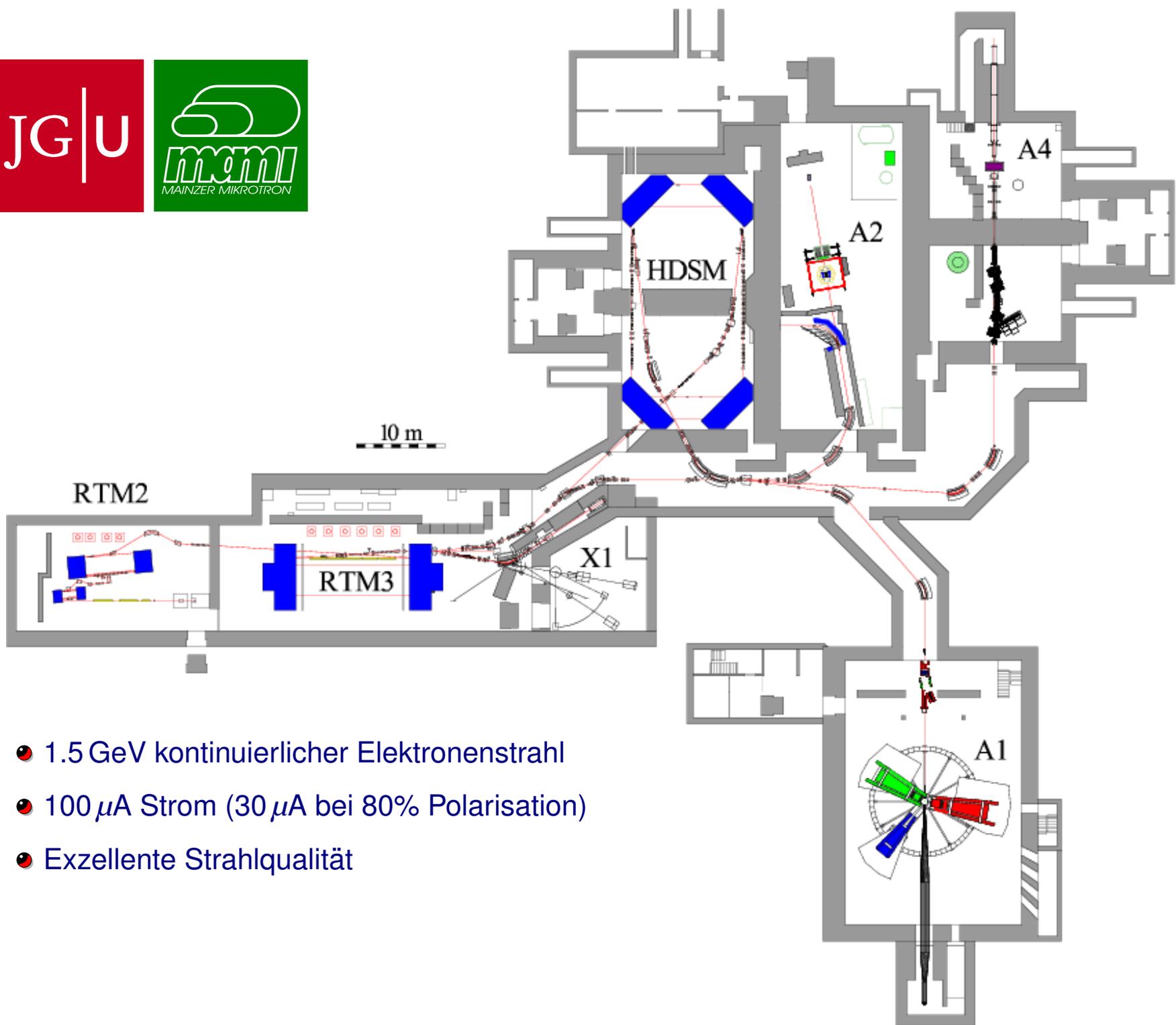
Andere Untergründe: Messung!

# Bethe-Heitler-Untergrund



- Peak bei  $m_{e^+e^-} = 0$
- Peak für asymmetrische Produktion
- Minimal bei symmetrischer Produktion bei  $x = 1$  (voller Energieübertrag auf  $\gamma$ )

# Das Experiment



- 1.5 GeV kontinuierlicher Elektronenstrahl
- 100  $\mu\text{A}$  Strom (30  $\mu\text{A}$  bei 80% Polarisation)
- Exzellente Strahlqualität

# A1: Spektrometeranlage an MAMI



## Spektrometer A:

$$\begin{aligned}\alpha &> 20^\circ \\ p &< 735 \frac{\text{MeV}}{c} \\ \Delta\Omega &= 28 \text{ msr} \\ \Delta p/p &= 20\%\end{aligned}$$

## Spektrometer B:

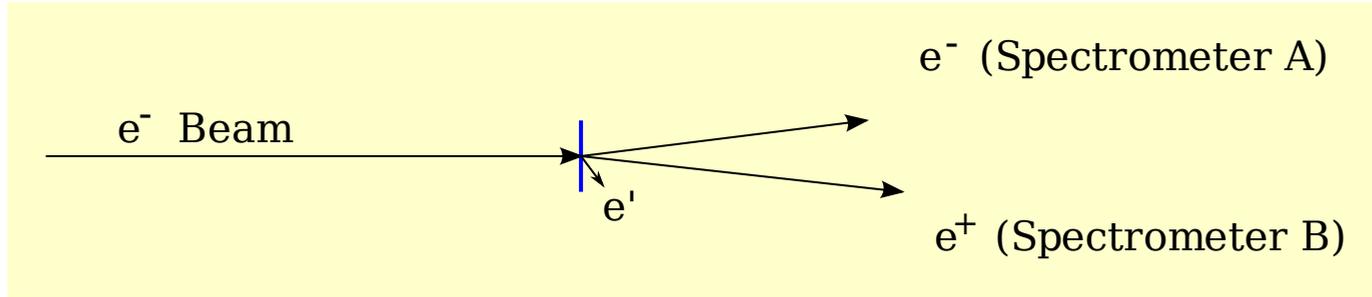
$$\begin{aligned}\alpha &> 8^\circ \\ p &< 870 \frac{\text{MeV}}{c} \\ \Delta\Omega &= 5.6 \text{ msr} \\ \Delta p/p &= 15\%\end{aligned}$$

## Spektrometer C:

$$\begin{aligned}\alpha &> 55^\circ \\ p &< 655 \frac{\text{MeV}}{c} \\ \Delta\Omega &= 28 \text{ msr} \\ \Delta p/p &= 25\%\end{aligned}$$

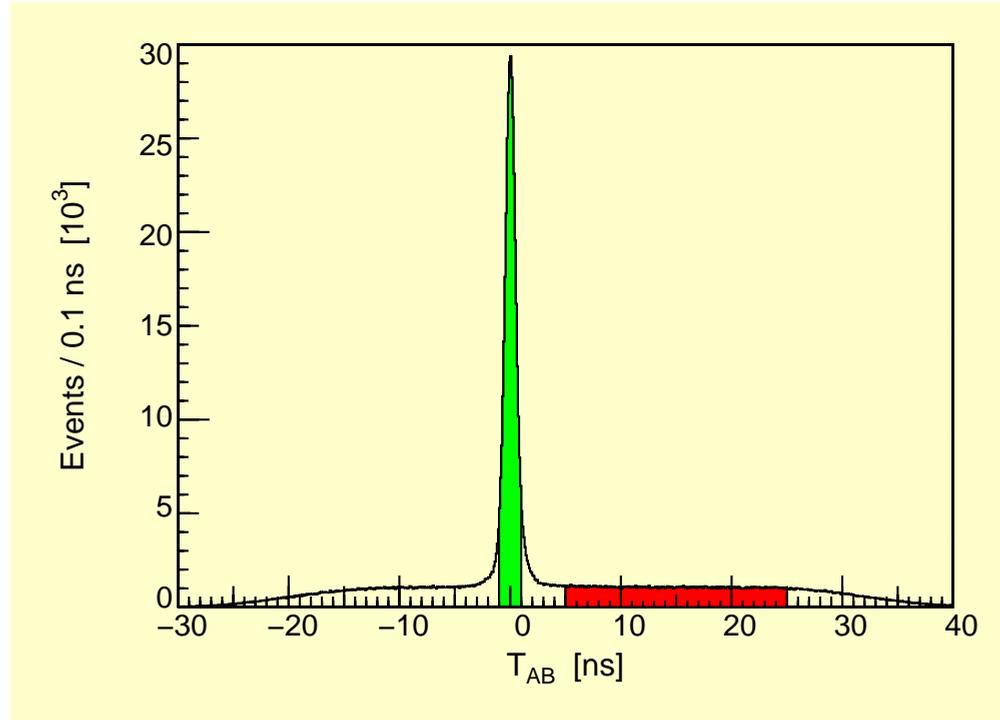
$$\delta p/p < 10^{-4}$$

# Pilot-Experiment



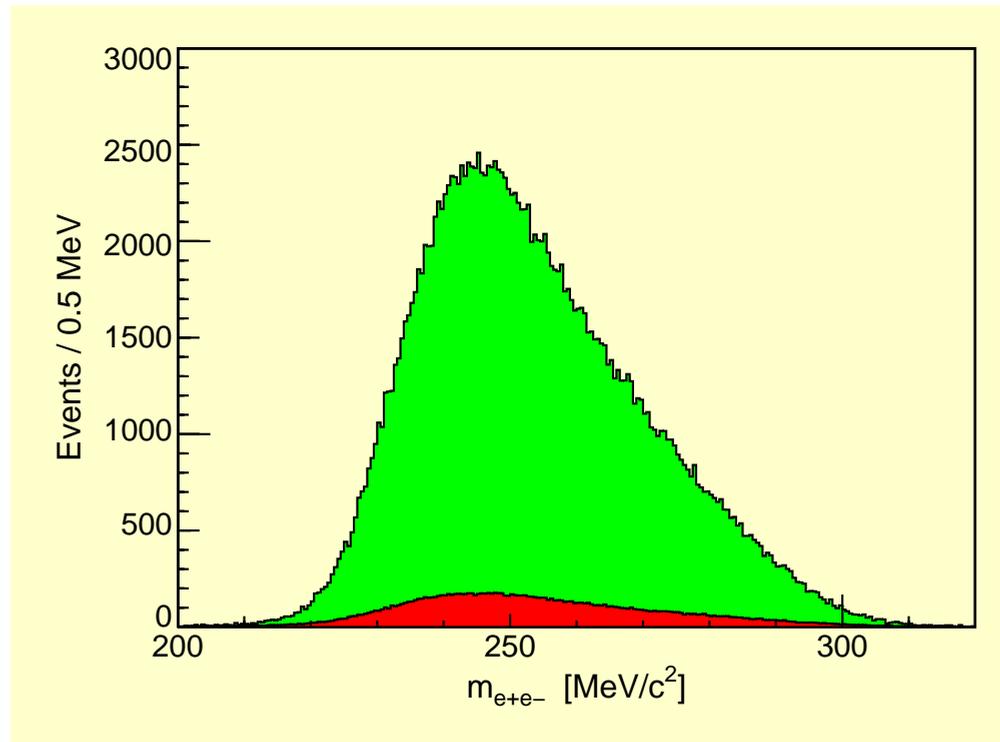
- Target: 0.05 mm Tantal (mono-isotopisch  $^{181}\text{Ta}$ )
- Strahlstrom:  $100\mu\text{A}$
- Luminosität:  $L = 1.7 \cdot 10^{35} \frac{1}{\text{scm}^2}$  ( $L \cdot Z^2 \approx 10^{39} \frac{1}{\text{scm}^2}$ )
- Kompletter Energieübertrag auf  $\gamma'$ -Boson ( $x = 1$ )
- Minimale Winkel der Spektrometer
- Spektrometer-Setup möglichst symmetrisch

Strahl-Energie	$E_0 = 855.0 \text{ MeV}$
Spektrometer A	$p_{e^-} = 338.0 \text{ MeV}/c$
	$\theta_{e^-} = 22.8^\circ$
Spektrometer B	$p_{e^+} = 470.0 \text{ MeV}/c$
	$\theta_{e^+} = 15.2^\circ$



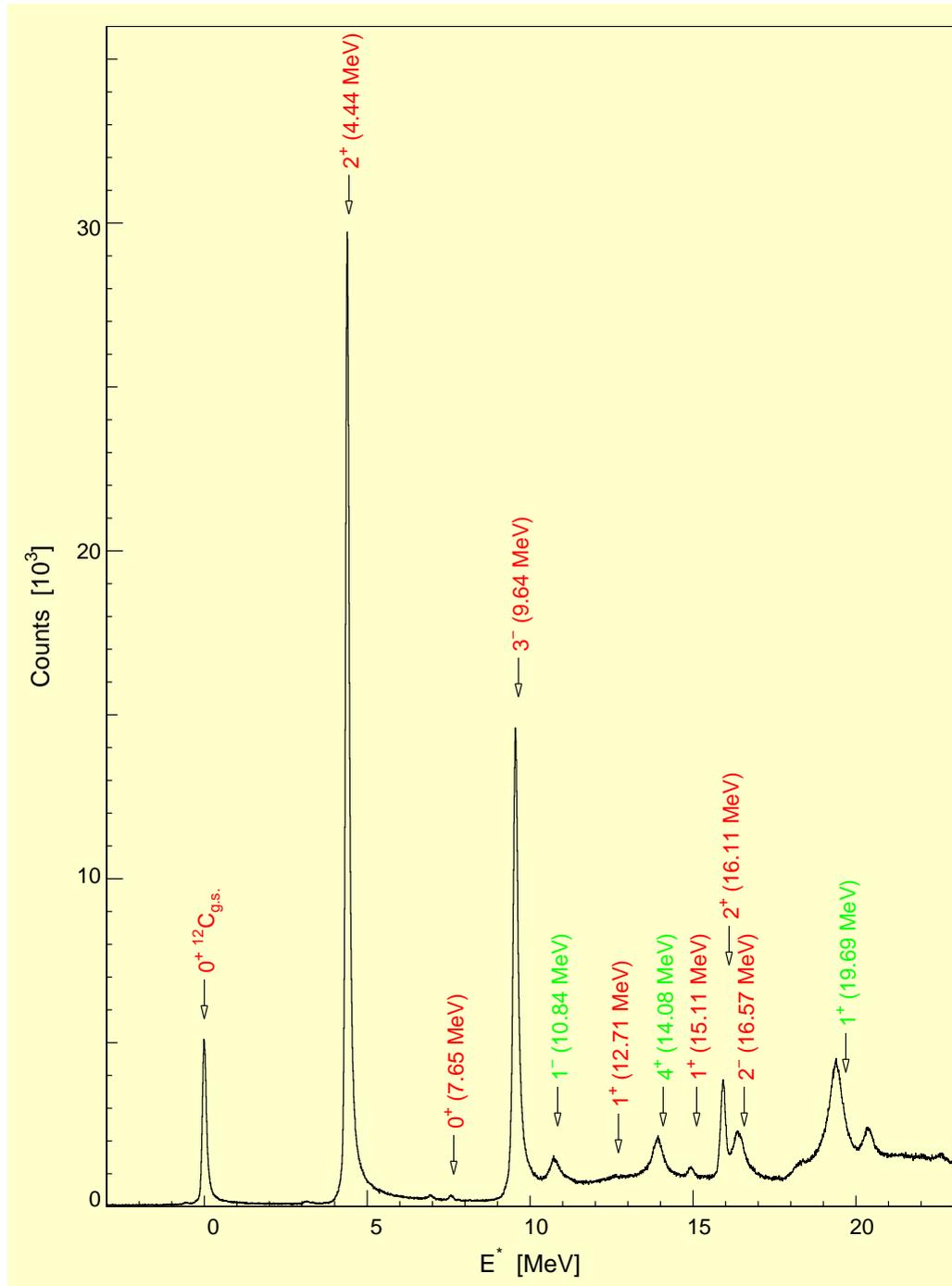
- Teilchenidentifizierung  $e^+, e^-$  mit Tscherenkov-Detektor
- Korrektur der Fluglänge im Spektrometer  $\approx 12$  m  
⇒ Reaktion identifiziert mittels Flugzeit
- Koinzidenzzeitauflösung  $\approx 1$  ns FWHM
- Untergrundabschätzung: Seitenband  $5$  ns  $< T_{A \wedge B} < 25$  ns
- Fast kein zufälliger Untergrund  $\approx 5\%$
- Oberhalb des Untergrunds: nur koinzidente  $e^+e^-$ -Paare!

# Invariante Masse des $e^+e^-$ -Paars



- Masse des  $e^-e^+$ -Paars  $m_{\gamma'}^2 = (e^- + e^+)^2$
- Welche Breite erwarten wir?

# Bestimmung der Massenauflösung



## • Elastische Streuung

- ▶ Natürliche Breite  $\ll$  Auflösung
- ▶ Linienbreite gibt obere Grenze
- ▶  $\delta p/p < 10^{-4}$  für Spektrometer

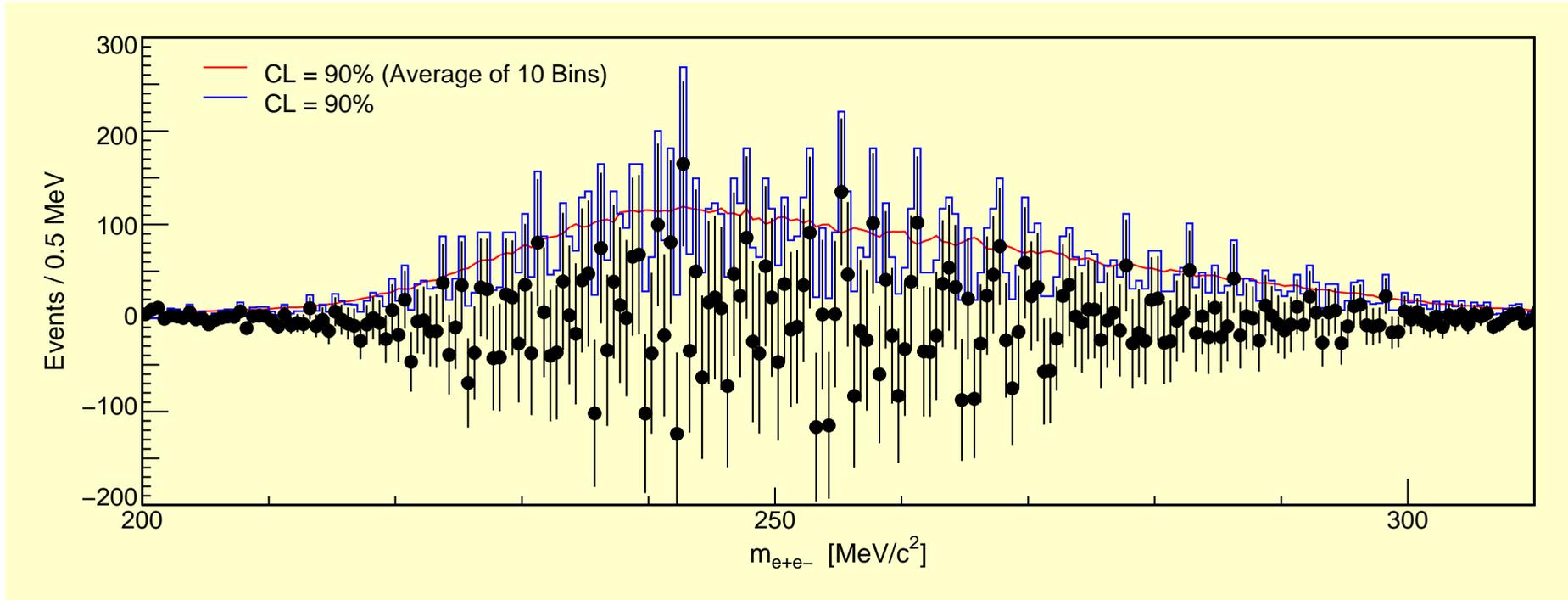
## • Input für volle Simulation

- ▶ Vielfachstreuung (-)
- ▶ Strahlungskorrekturen (-)
- ▶ Zerfallslänge (+)
- ▶ Missing-Mass Auflösung (+)

$$\Rightarrow \delta m_{e^+e^-} < 0.5 \text{ MeV}/c^2 \text{ FWHM}$$

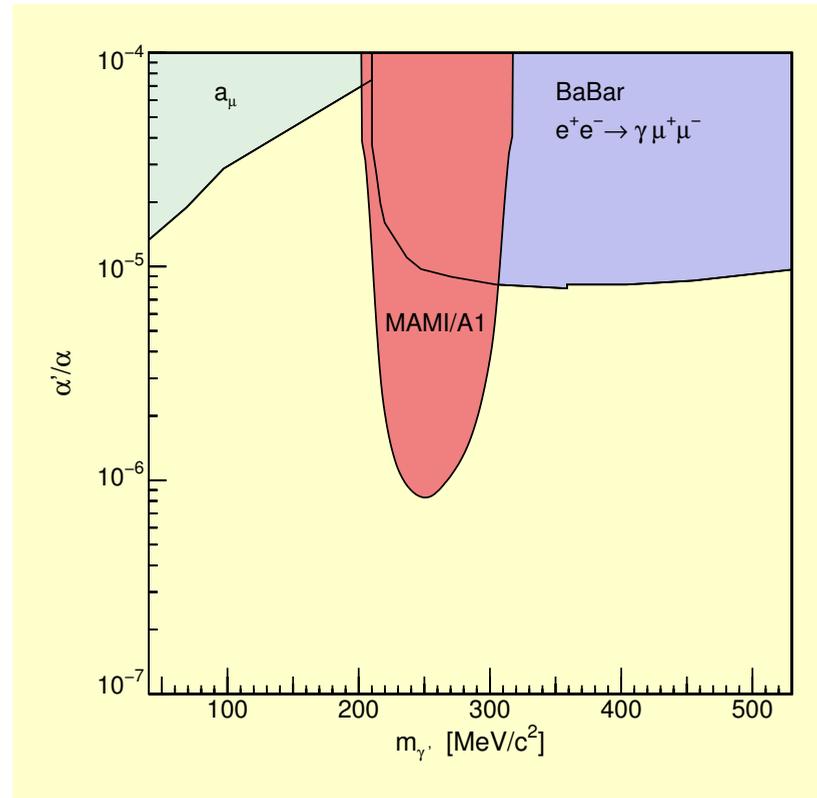
N.B.: Systematischer Fehler  $\delta m_{e^+e^-} < 10^{-3}$ !

# Ausschlussgrenzen



- Konfidenzgrenzen mittels Feldman-Cousins-Algorithmus
- „Modell“ für Untergrund:  
Mittel von 3 Bins links und rechts des Zentralbins
- Auflösung  $\delta m < 500 \text{ keV} = \text{Binbreite}$
- Mittelung (über 10 Bins) für Abschätzung

# Ausschlussgrenzen für Mischungsparameter $\varepsilon$



- Zufälliger Untergrund + QED-Untergrund
- Modellabhängigkeiten nur am Kern-Vertex für  $\gamma'$  und  $\gamma^*$
- Aus Verhältnis der Wirkungsquerschnitte:

$$\frac{d\sigma(X \rightarrow \gamma' Y \rightarrow l^+ l^- Y)}{d\sigma(X \rightarrow \gamma^* Y \rightarrow l^+ l^- Y)} = \left( \frac{3\pi\varepsilon^2}{2N_f\alpha} \right) \left( \frac{m_{\gamma'}}{\delta_m} \right)$$

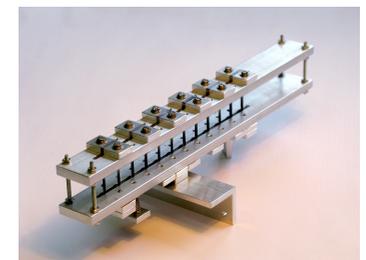
⇒ Ausschlussgrenzen für 4 Tage Strahlzeit  $\varepsilon < 10^{-3}$

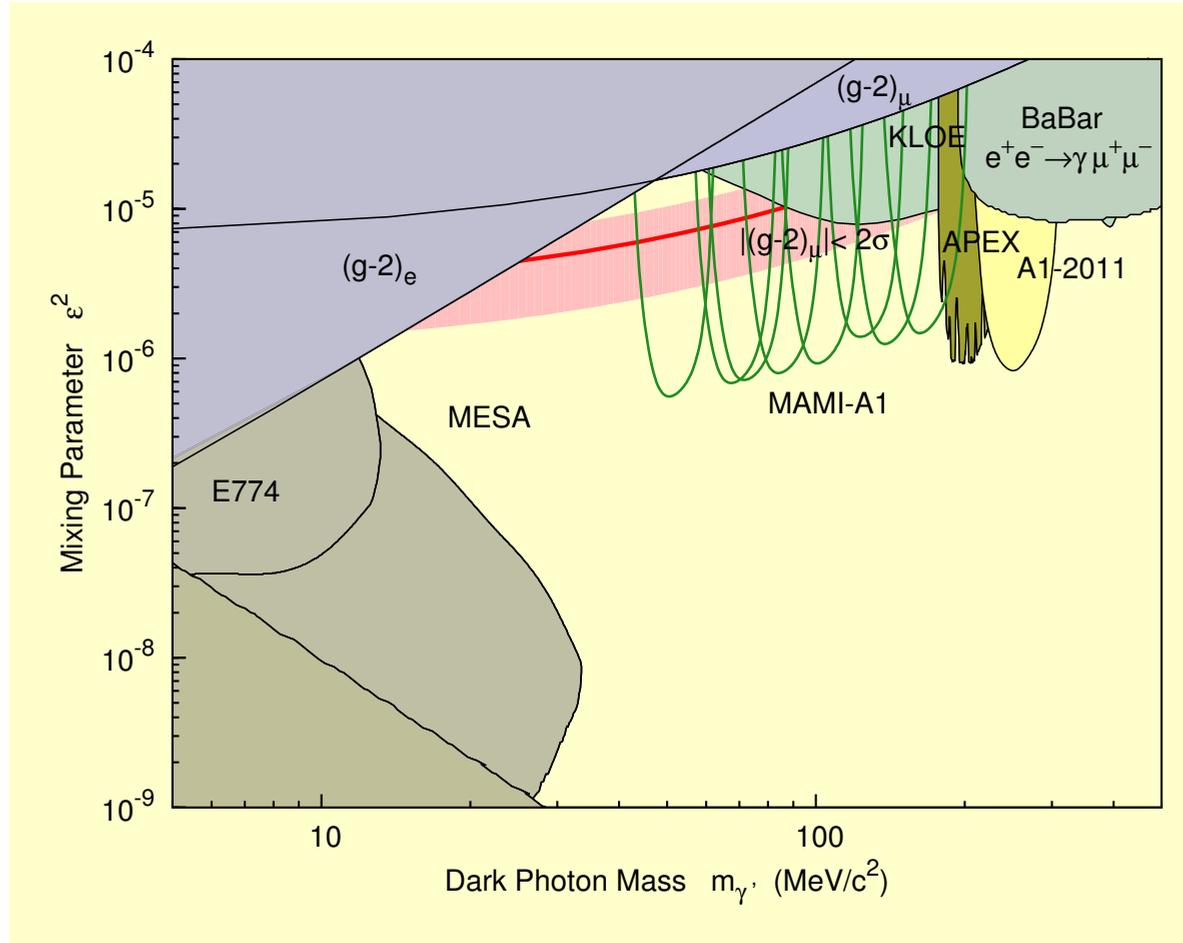
# Data 2012/2013 - Kinematiken

Kinematik	$E_0$ (MeV)	$p_A$ (MeV/c)	$p_B$ (MeV/c)	$\bar{I}_0$ ( $\mu\text{A}$ )	Target (mg/cm <sup>2</sup> )	$t$ $t$
DM2012_57	180	78.7	98.0	2.2	Foil 9.4	12h 30' 56"
DM2012_72	240	103.6	132.0	5.5	Foil 9.4	46h 53' 18"
DM2012_77	255	110.1	140.4	7.0	Foil 9.4	43h 49' 11"
DM2012_91	300	129.5	164.5	11.7	Foil 9.4	37h 56' 03"
DM2012_109	360	155.4	197.6	16.6	Foil 9.4	5h 15' 29"
DM2012_138	435	190.7	247.7	43.4	Foil 9.4	44h 3' 27"
DM2012_150	495	213.7	271.6	7.0	Stack 113.1	36h 25' 16"
DM2012_177	585	250.0	317.3	16.3	Stack 113.1	29h 37' 03"
DM2012_218	720	309.2	392.7	19.4	Stack 113.1	76h 0' 20"

Spektrometer	Winkel	Raumwinkel (msr)	$\Delta p/p$
A (electron)	20.01°	21.0	20%
B (positron)	15.63°	5.6	15%

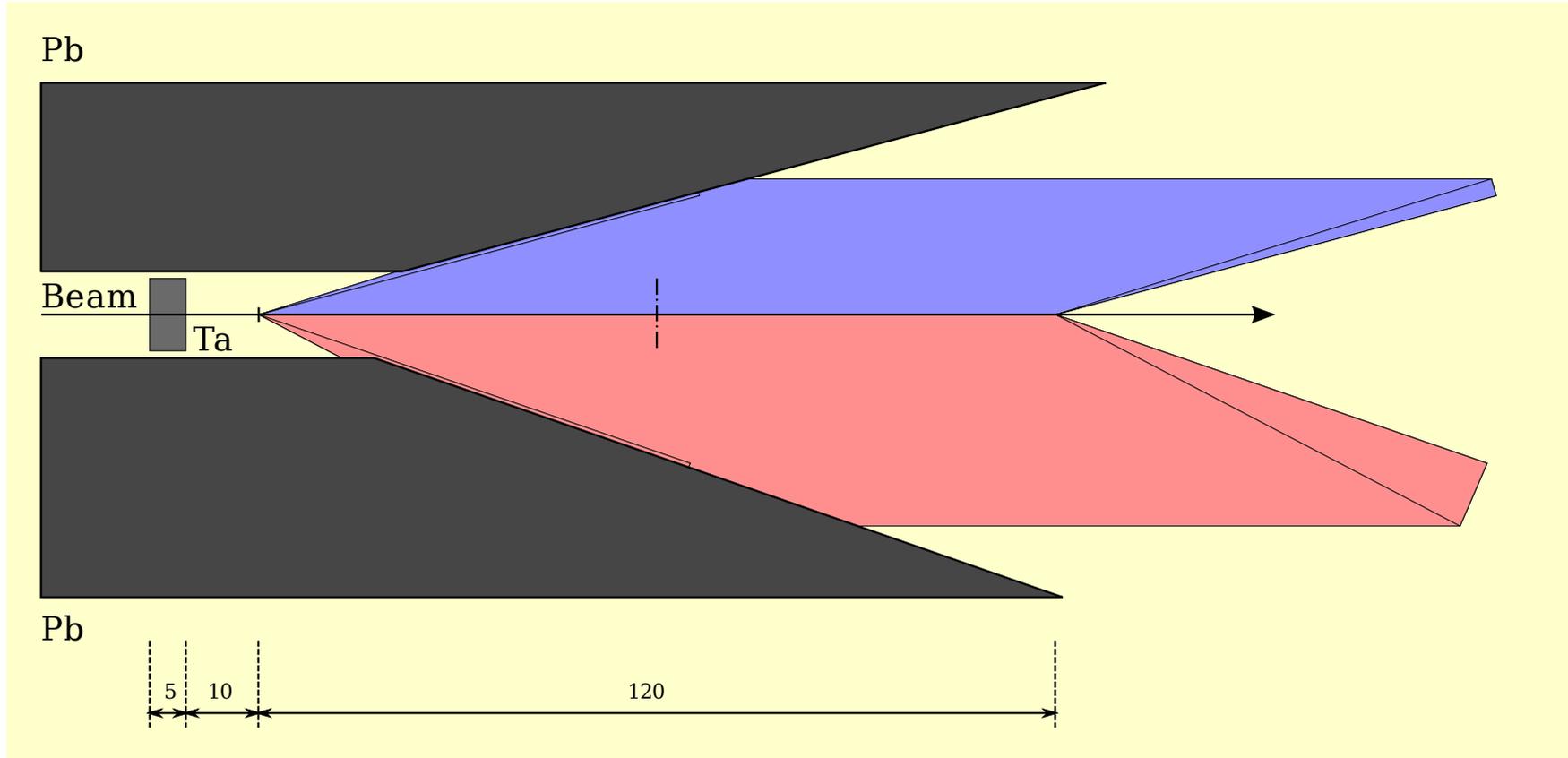
- Massenbereich  $50 \text{ MeV} < m_\gamma < 200 \text{ MeV}$
- 9 verschiedene Strahlenergien





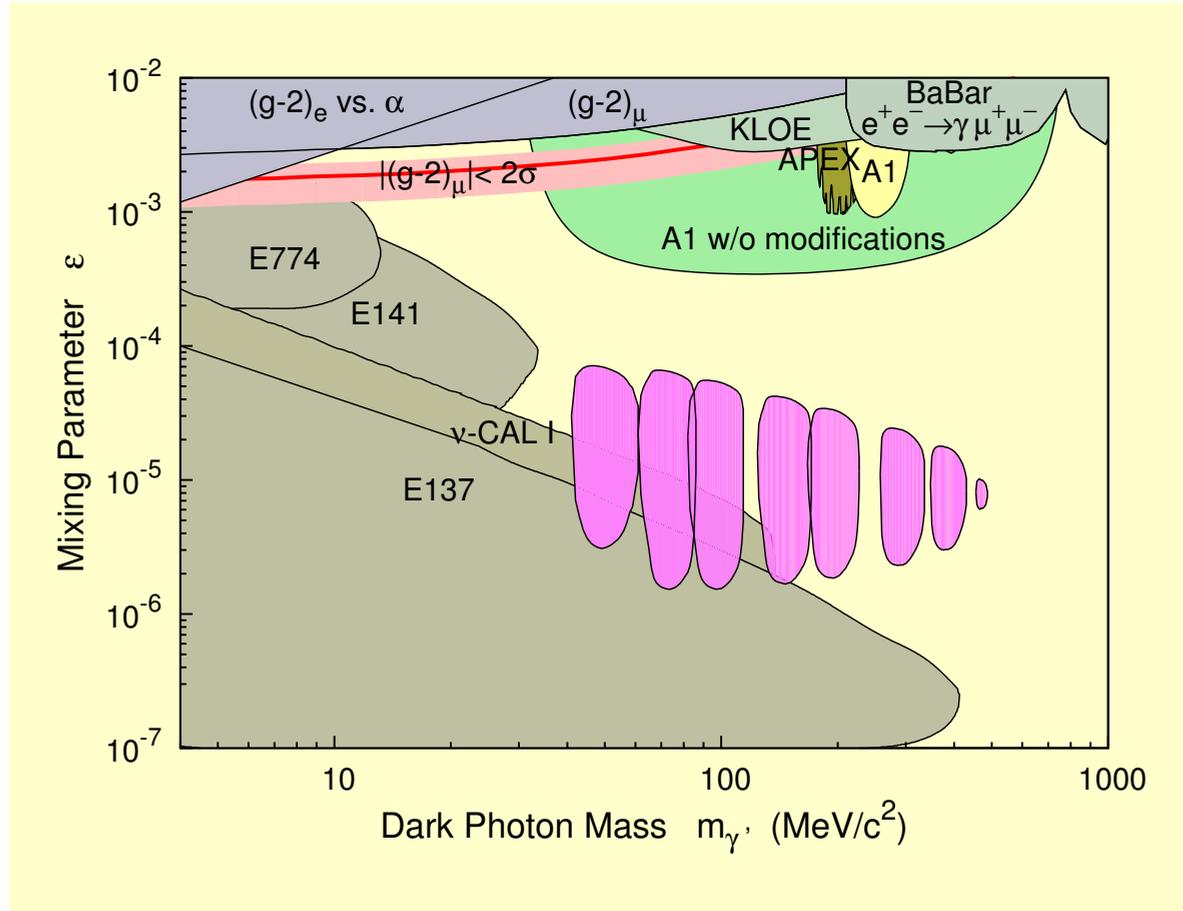
- Erster Teil 2013
- Fortsetzung Ende des Monats

## 2. Schritt Sekundärvertex → kleine Kopplungskonstante



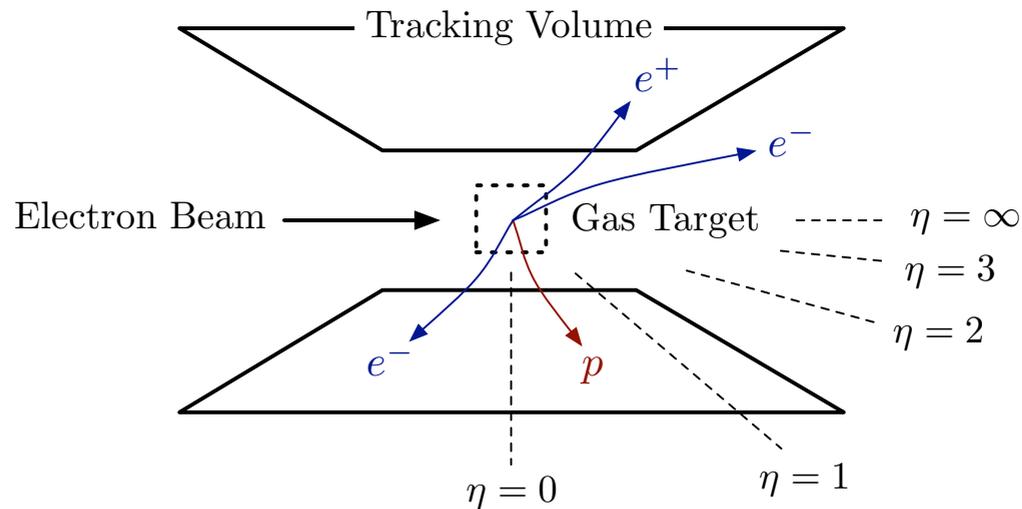
- Sensitiv auf Zerfallslängen von 10 mm – 130 mm
- $\Rightarrow \gamma\tau = 4.35 \text{ mm} - 1120 \text{ mm}$  (10%-Grenze)
- $\Rightarrow \varepsilon = 10^{-6} - 10^{-5}$
- Target: 5 mm Ta  $\Rightarrow L = 1.72 \cdot 10^{37} \frac{1}{\text{scm}^2}$  bei  $100 \mu\text{A}$  Strahlstrom
- Strahlstabilisierung, Abschirmung, Kühlung

## 2. Schritt: Ausschlussgrenzen mit abgeschirmten Produktionsvertex

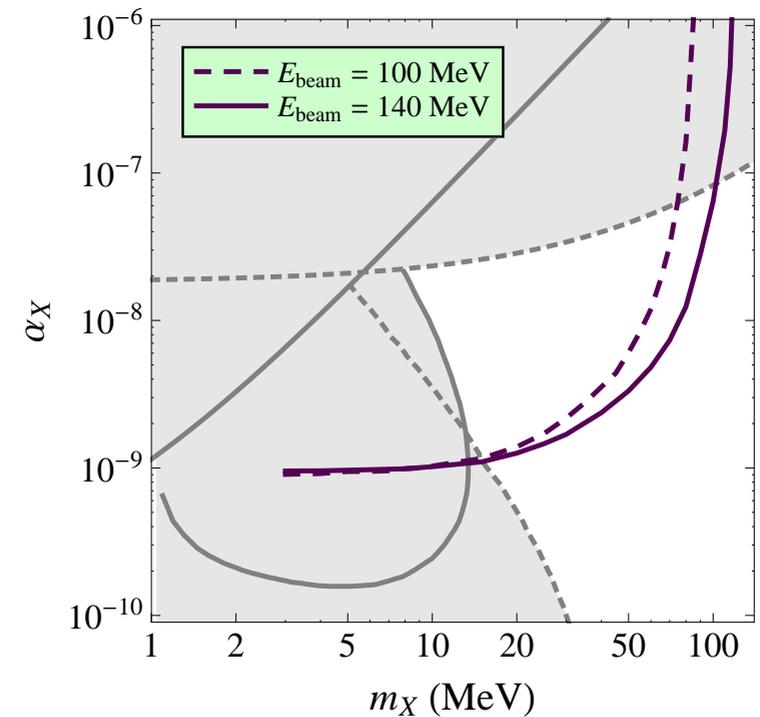


- Makroskopische Zerfallslänge  $\epsilon < 10^{-4}$
- Luminosität  $\epsilon > 10^{-6}$
- Kopplungsstärke gegen Lebensdauer  $m_{\gamma'} < 500 \text{ MeV}/c^2$
- Winkelbereich  $m_{\gamma'} > 30 \text{ MeV}/c^2$

### 3. Schritt: Bereich niedriger Masse

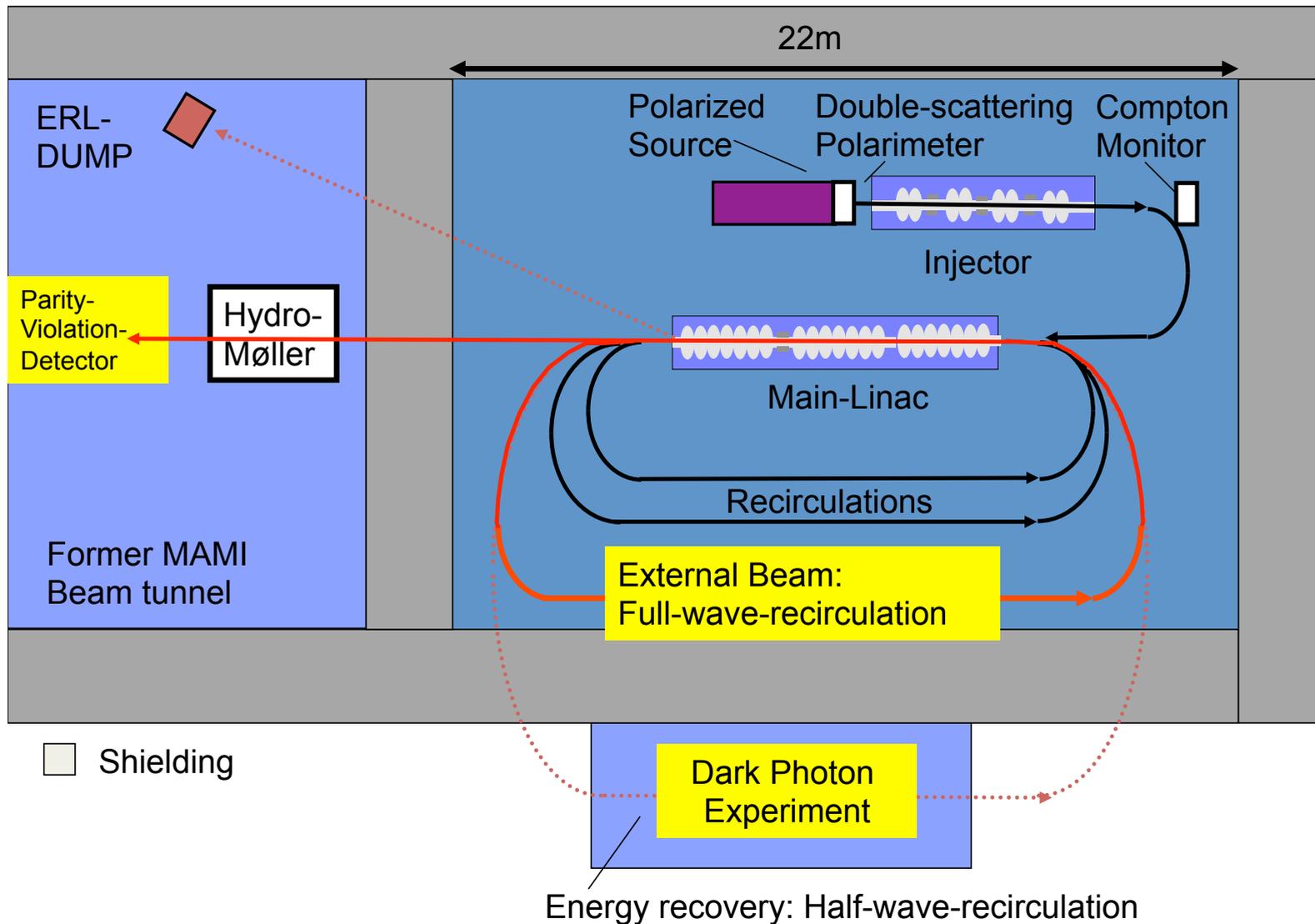


Reach for  $1 \text{ ab}^{-1}$  (Vector)



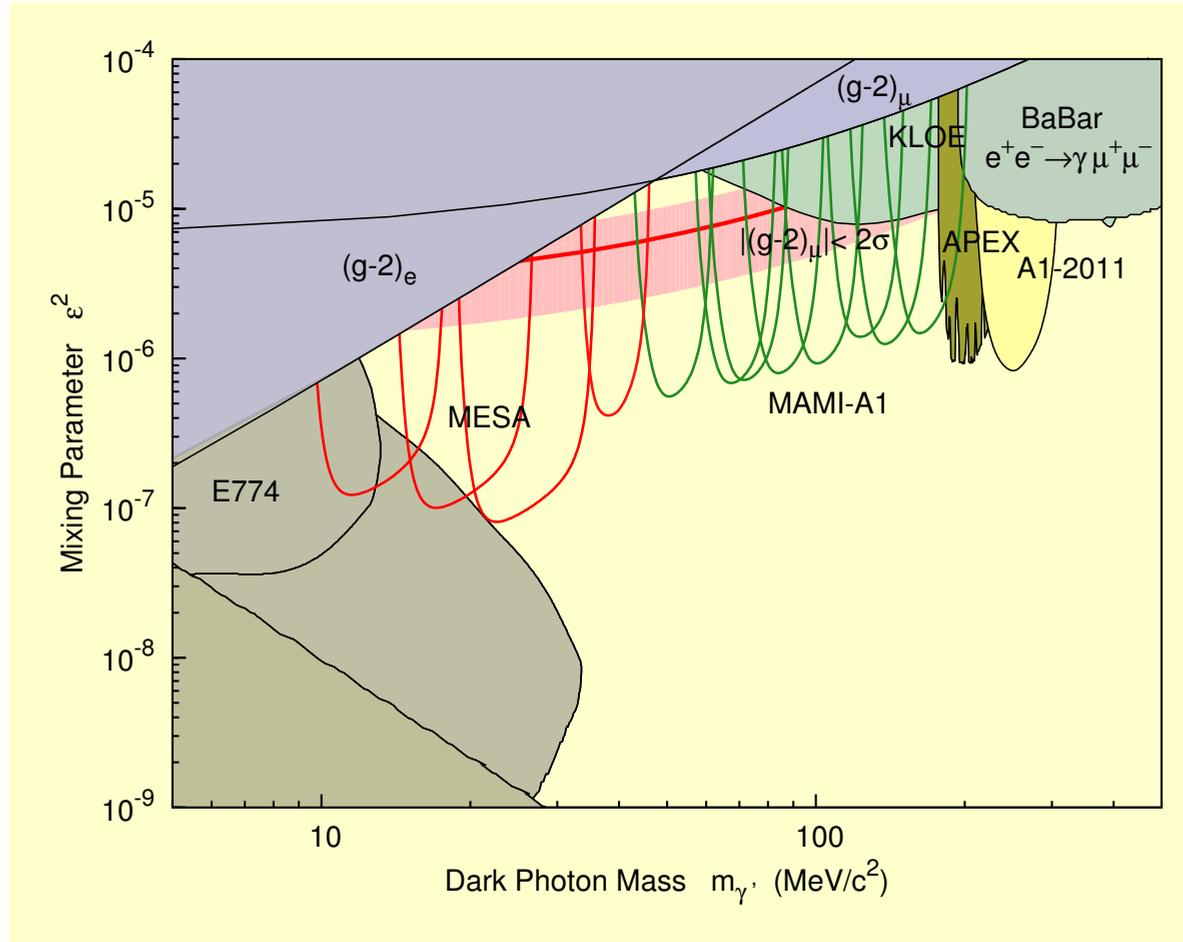
- Konzept: DarkLight (JLab FEL)
- Vielfachstreuung wird durch Gas-Target minimiert
- Niedrige Energie – Hoher Strom bei sehr guter Strahlqualität
- $4\pi$ -Detektor bei 200 MHz Zählrate bei hoher Auflösung

### 3. Schritt: Bereich niedriger Masse, MESA Beschleuniger



Energie-Rückgewinnung mit supraleitendem Linearbeschleuniger  
 $\Rightarrow L = 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  mit internem Wasserstoff-Gastarget

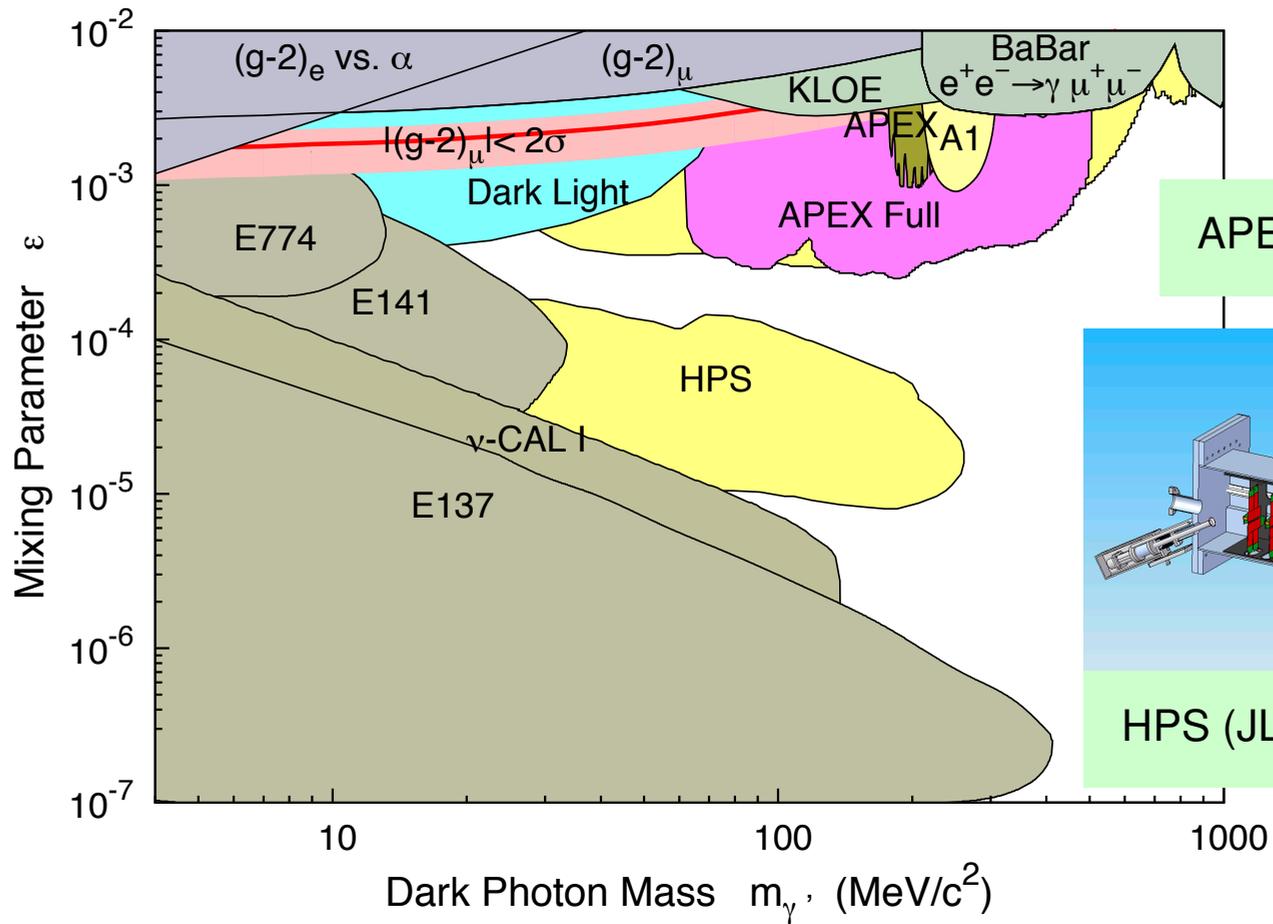
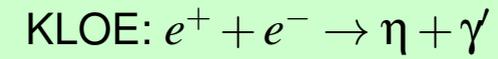
### 3. Schritt: Bereich niedriger Masse, MESA Beschleuniger



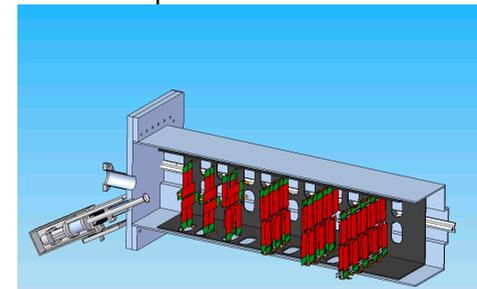
- Target: Xenon
- Detektoren: Zwei Spektrometer
- ca. 1 Monat Messzeit

# Laufende Projekte weltweit

Dark Light (JLab FEL)  
Freysis et al. arXiv:0909.2862

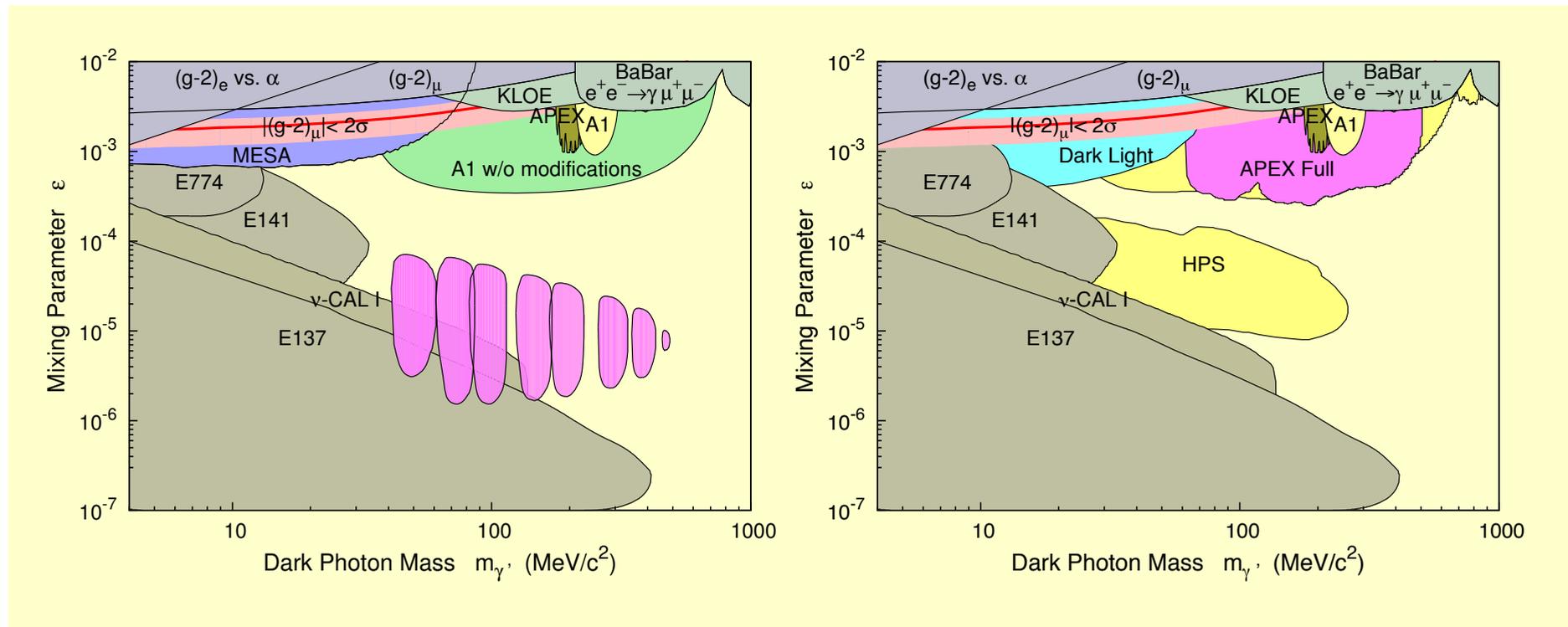


APEX (JLab Hall A)



HPS (JLab Hall B)

# Zusammenfassung



## ● Experimentelles Programm:

- ▶ Paarproduktion am schweren Targetkern
- ▶ Niedrige Energie – hoher Strom
- ▶ Endlicher Produktionsvertex

$$\begin{aligned} \epsilon &> 4 \cdot 10^{-4} \\ m_{\gamma'} &< 50 \text{ MeV}/c^2 \\ 10^{-6} &< \epsilon < 10^{-4} \end{aligned}$$

## ● Pilotexperimente an MAMI und JLab

- ▶ Experimente sind machbar, zufälliger Untergrund ist gering
- ▶ Q.E.D.-Prozess ist verstanden und berechenbar auf 1%
- ▶ Neue Messungen mit ausgedehntem Bereich

Bestimmung signifikanter Ausschlussgrenzen für  $\gamma'$ -Bosonen mit existierenden Anlagen möglich