



Die Entdeckung des Positrons



Michele Piero Blago

Entdeckungsgeschichte



Entwicklung

Nebelkammer

C.T.R. Wilson

1911



Entdeckung

Kosmische

Strahlung

V.F. Hess

1912



Postulat

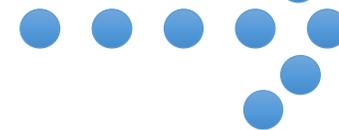
positives Elektron

P.A.M. Dirac

1928



1933



Entdeckung

Positron

C.D. Anderson



Diracs Postulat



Diracs Postulat



Diracs Postulat



Hamiltonian H für bel. em-Feld mit Skalarpotential A_0 und Vektorpotential \mathbf{A}

$$H := \left(\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \quad (1)$$

$$E = ih \frac{\partial}{\partial t} \quad (2)$$

$$p_r = -ih \frac{\partial}{\partial x_r}, \quad r = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Diracs Postulat



Wellengleichung

$$H\psi := 0 \quad (4)$$

Lösung 1

$$\left[\left(\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (5)$$

Lösung 2

$$\left[\left(-\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(-\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (6a)$$

Diracs Postulat



Wellengleichung

$$H\psi := 0 \quad (4)$$

Lösung 1

$$\left[\left(\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (5)$$

Lösung 2

$$\left[\left(-\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(-\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (6a)$$

Diracs Postulat



Wellengleichung

$$F\psi := 0 \quad (4)$$

Lösung 1

$$\left[\left(\frac{E}{c} + \frac{e}{c} A_0 \right)^2 + \left(\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (5)$$

Lösung 2

$$\left[\left(\frac{E}{c} + \frac{-e}{c} A_0 \right)^2 + \left(\vec{p} + \frac{-e}{c} \vec{A} \right)^2 + m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (6b)$$

Das Experiment

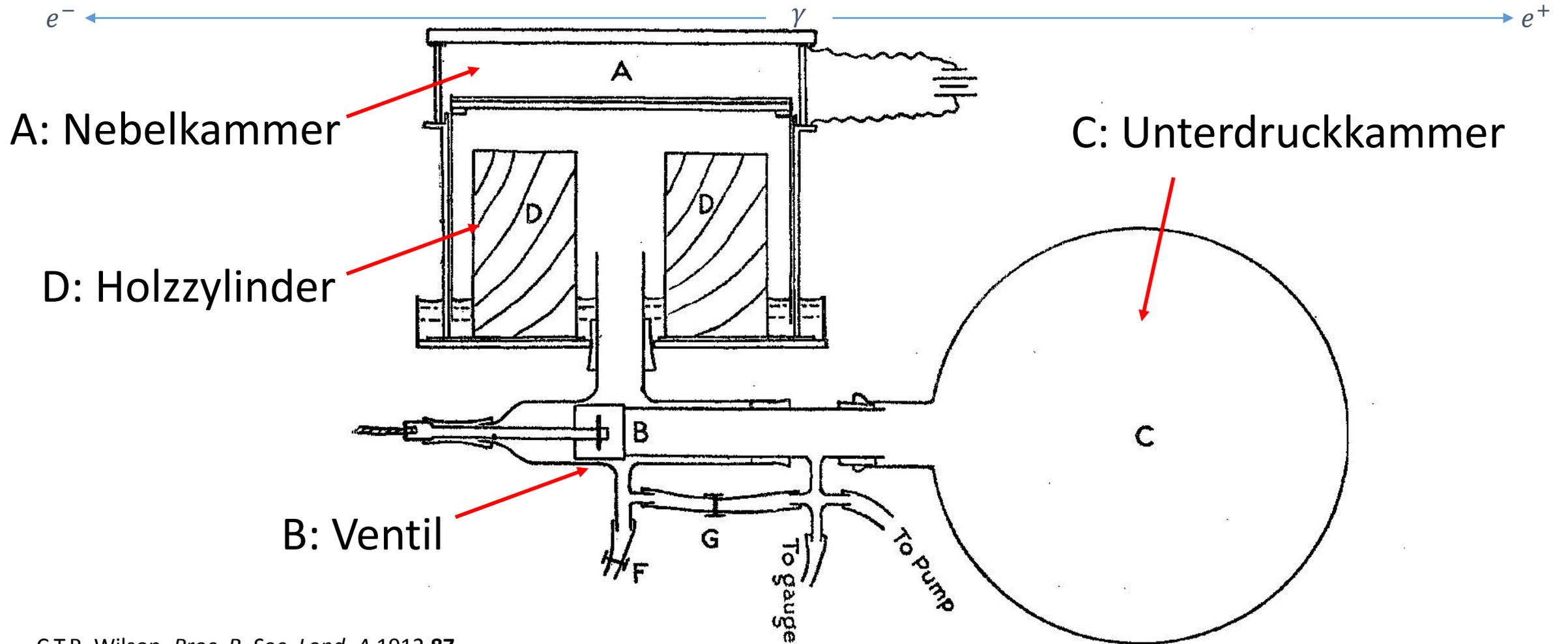


Das Experiment



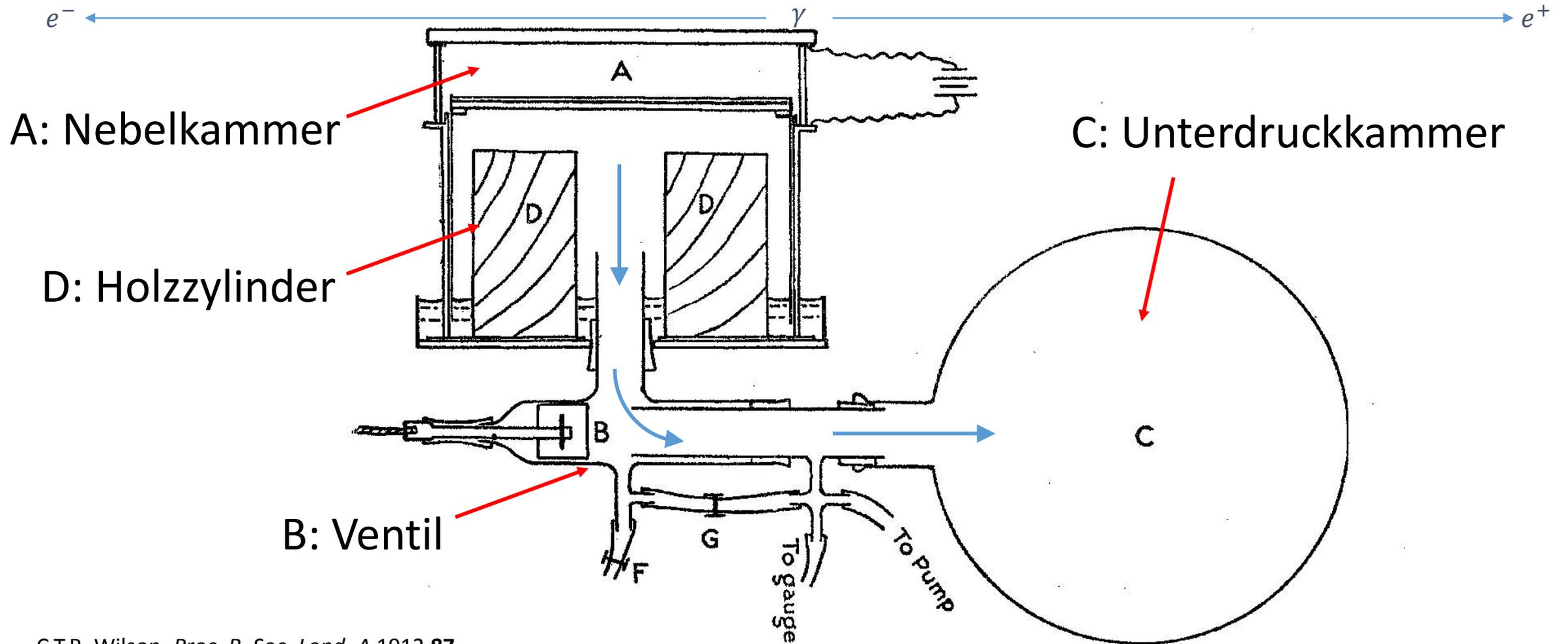
- Auftrag von R. A. Millikan
- Untersuchung der Kosmischen Strahlung
- Modifikation der Wilson Nebelkammer

Wilson'sche Nebelkammer



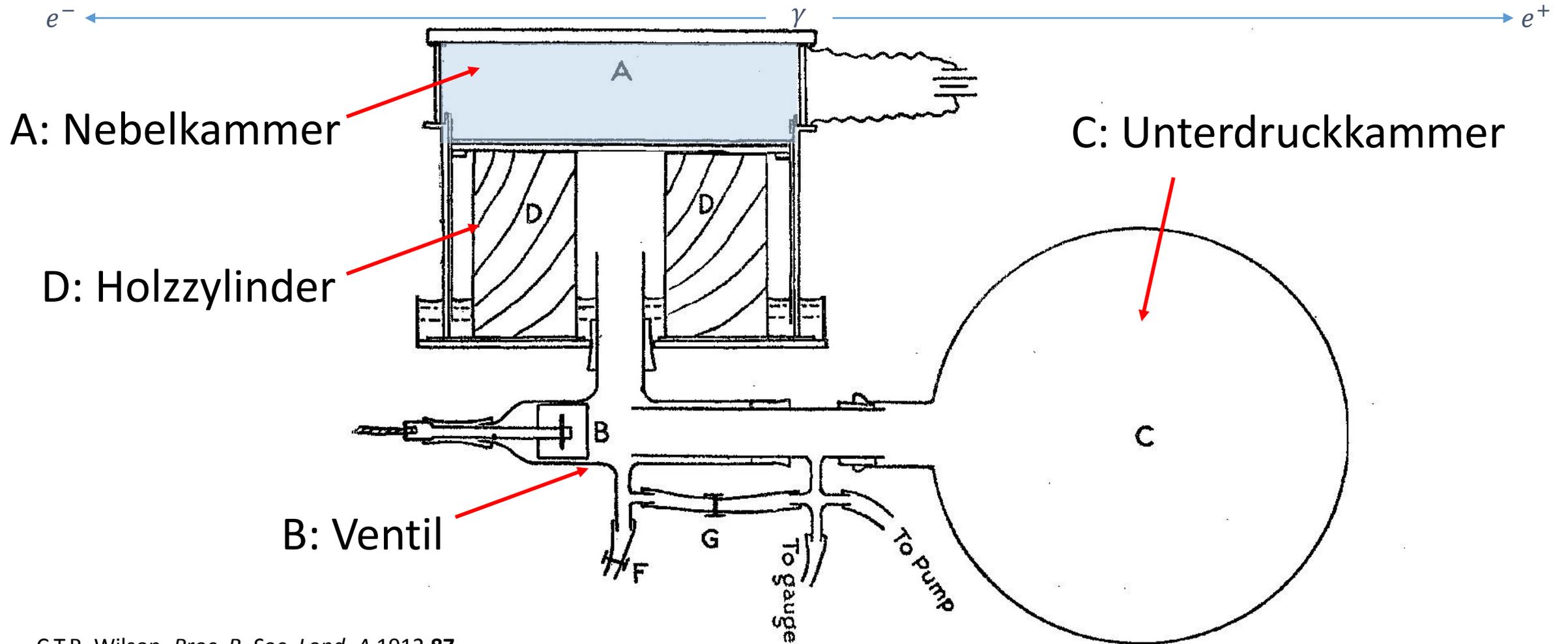
C.T.R. Wilson, *Proc. R. Soc. Lond. A* 1912 **87**

Wilsonsche Nebelkammer



C.T.R. Wilson, *Proc. R. Soc. Lond. A* 1912 **87**

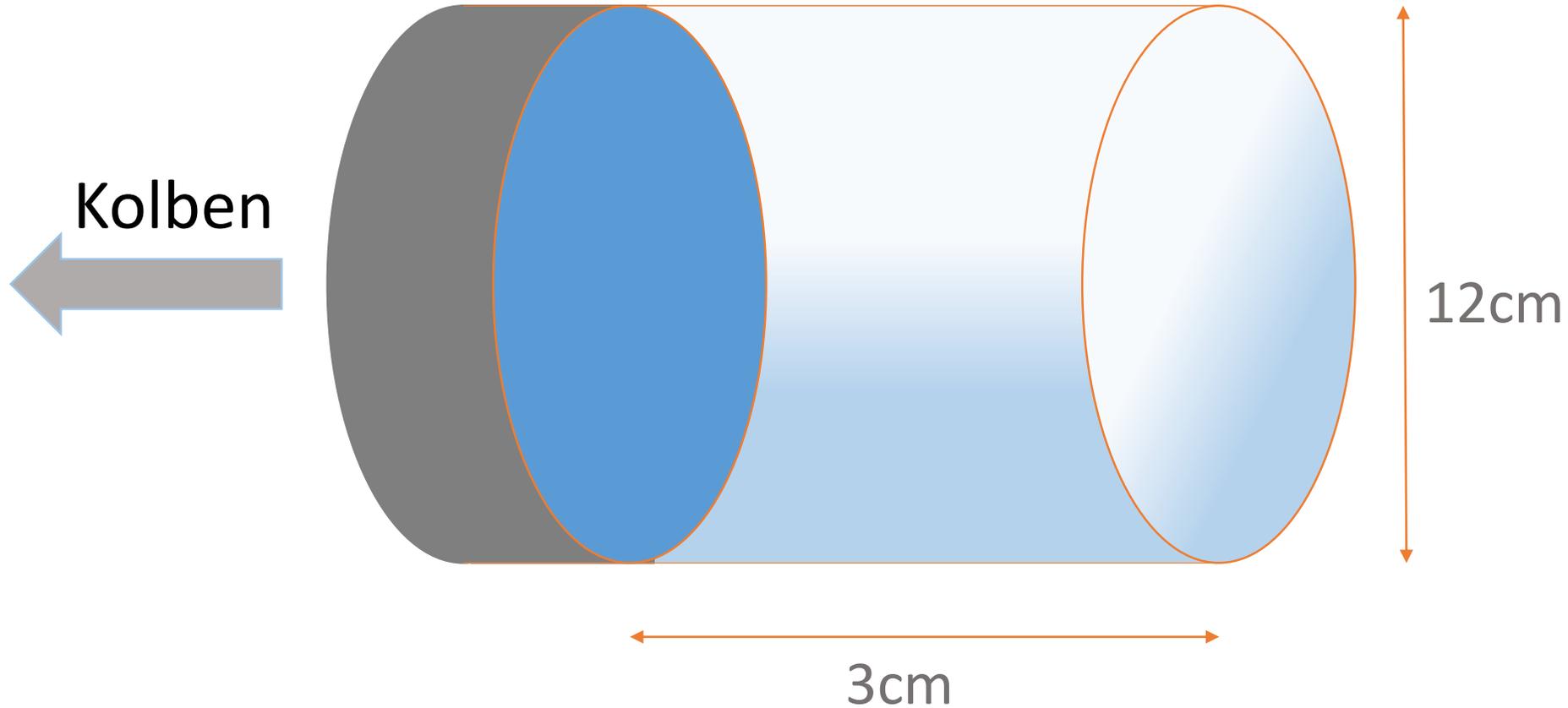
Wilsonsche Nebelkammer



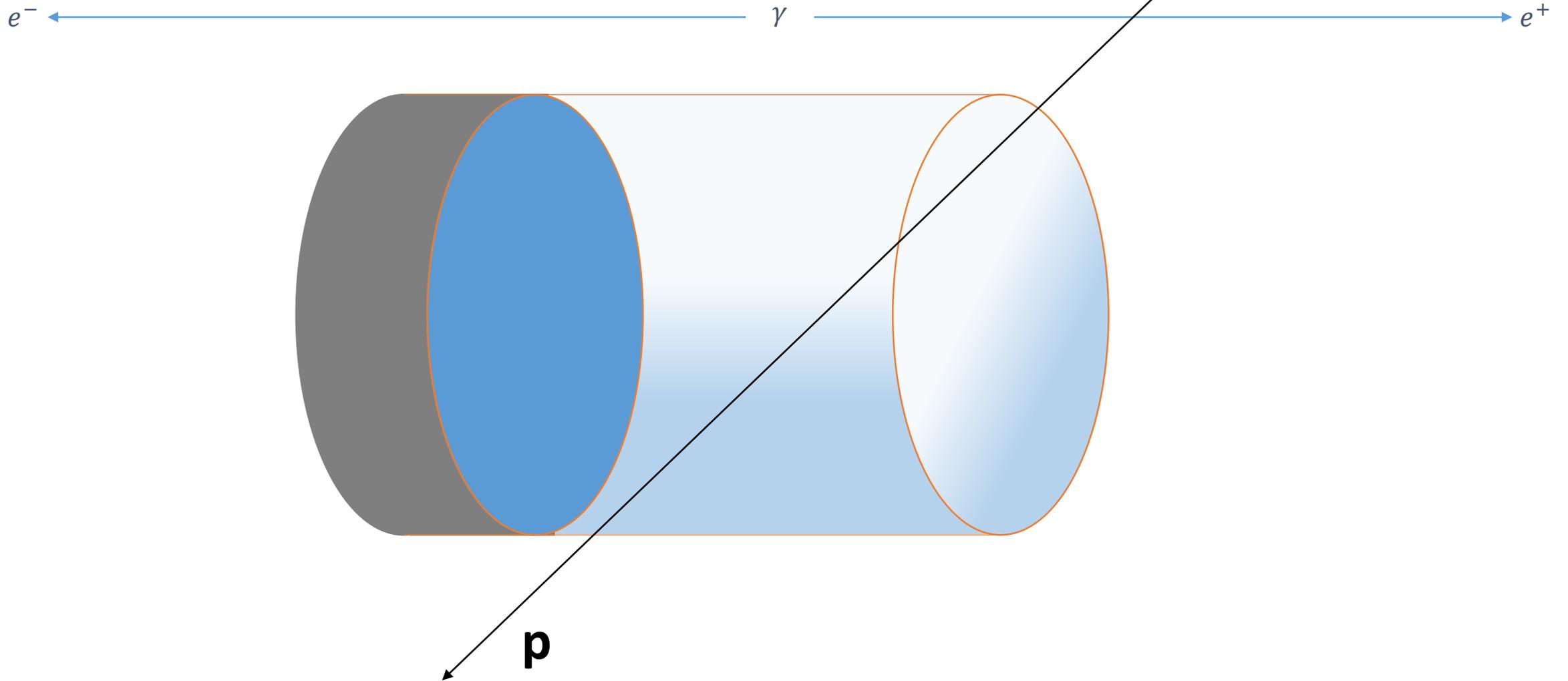
C.T.R. Wilson, *Proc. R. Soc. Lond. A* 1912 **87**

Andersons Nebelkammer

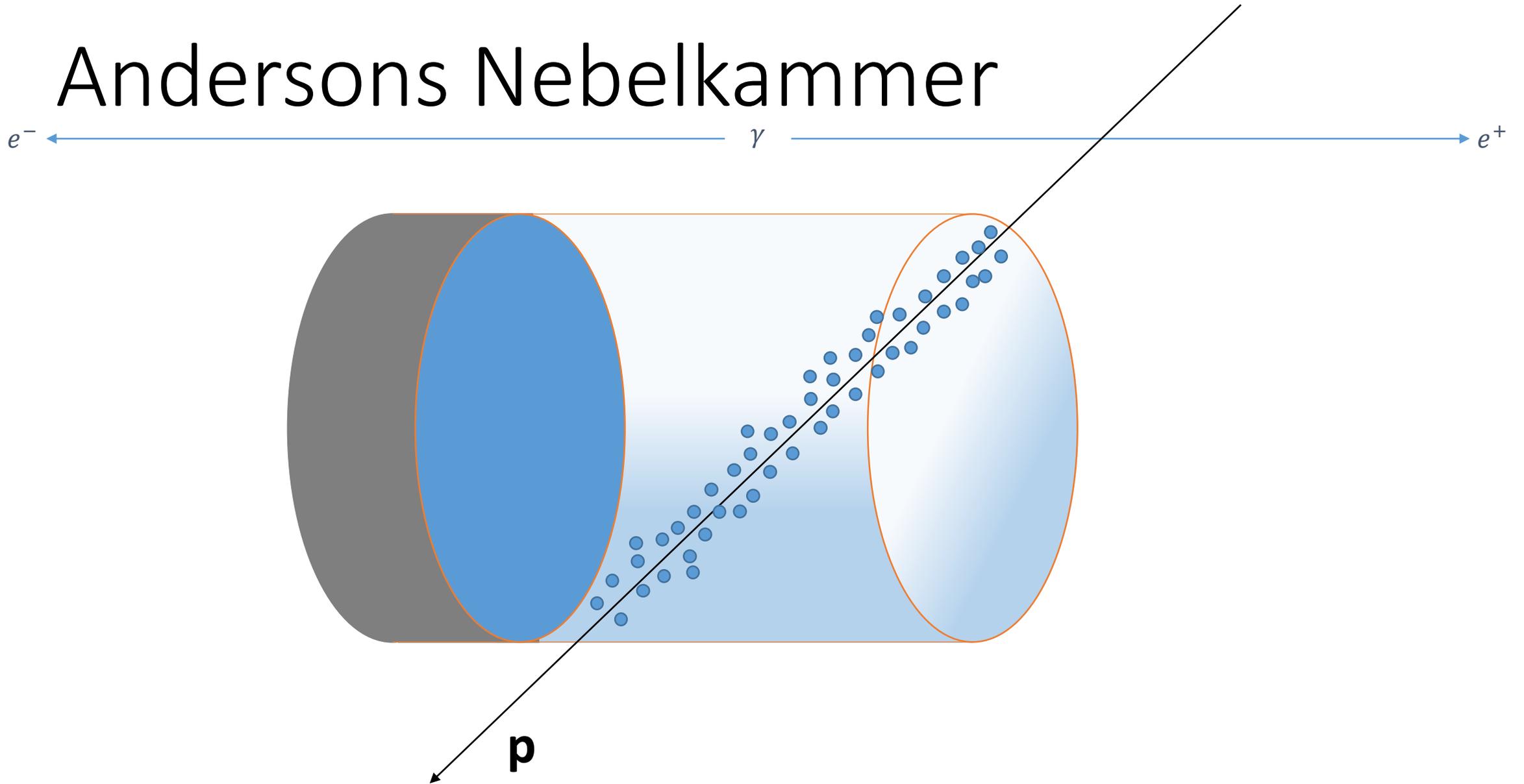
e^- ← γ → e^+



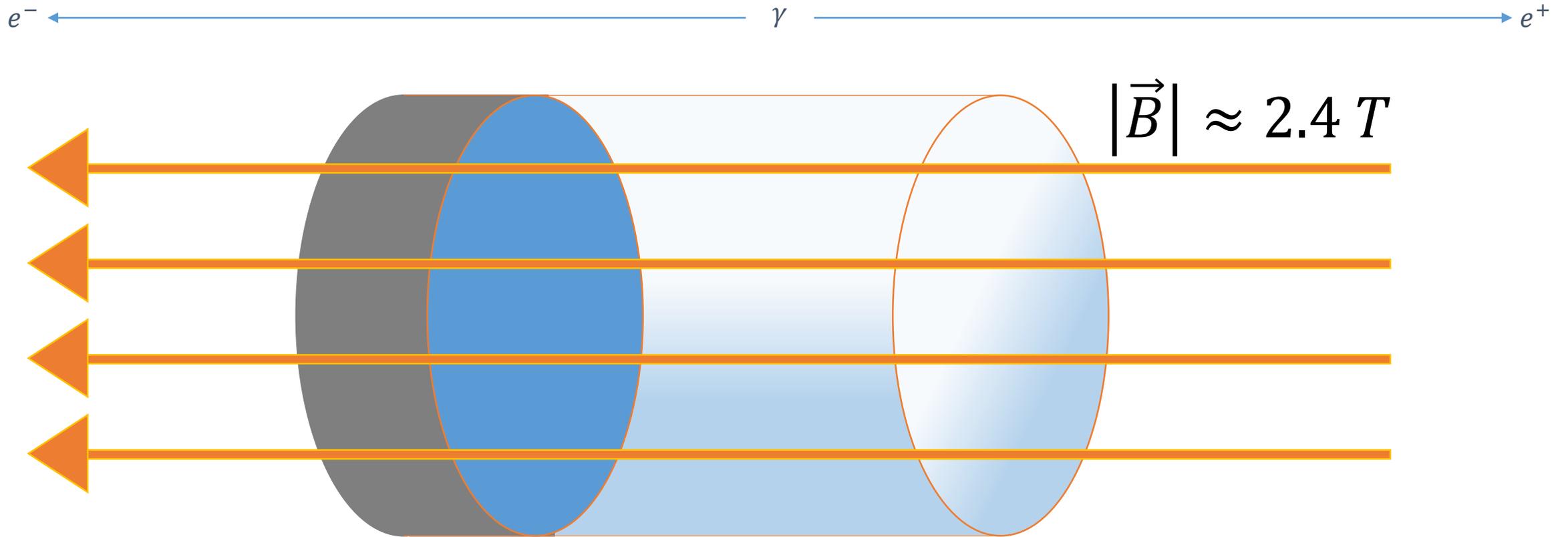
Andersons Nebelkammer



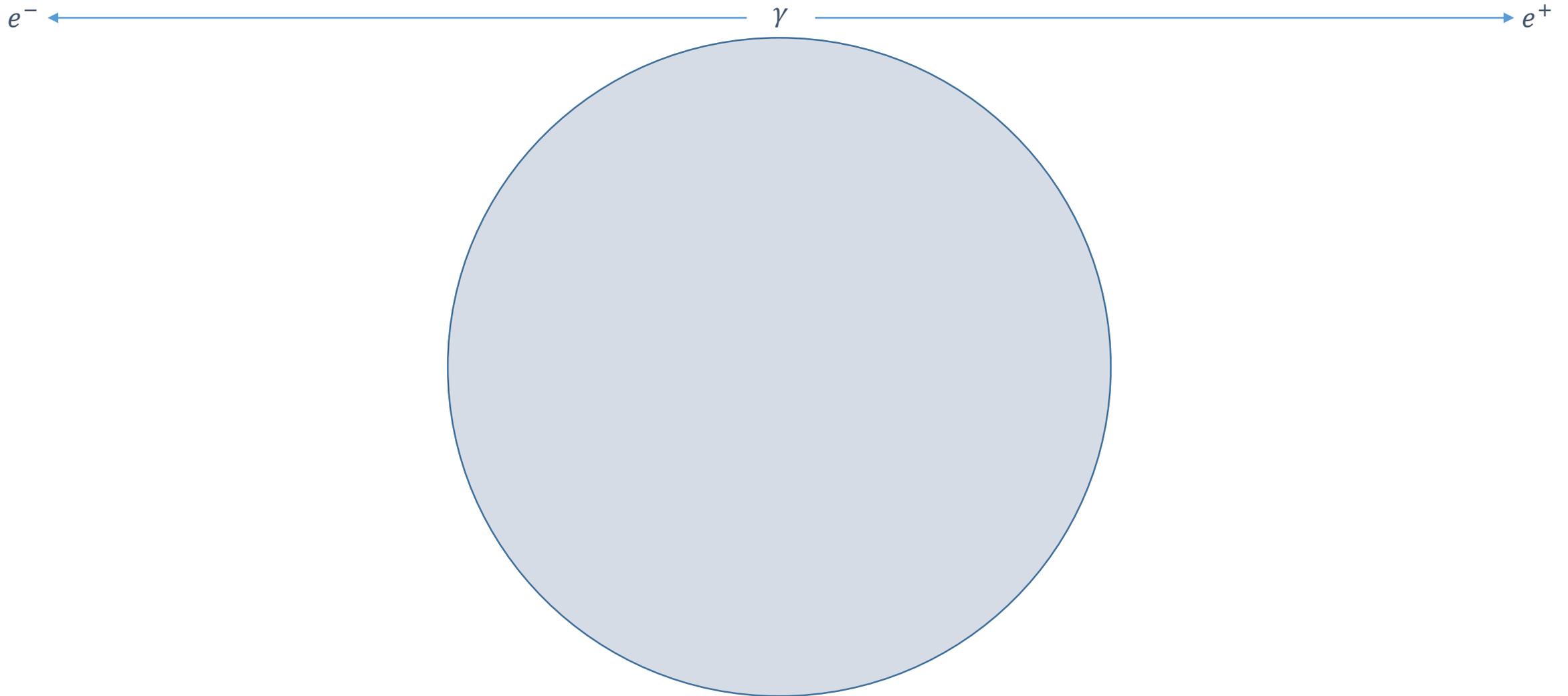
Andersons Nebelkammer



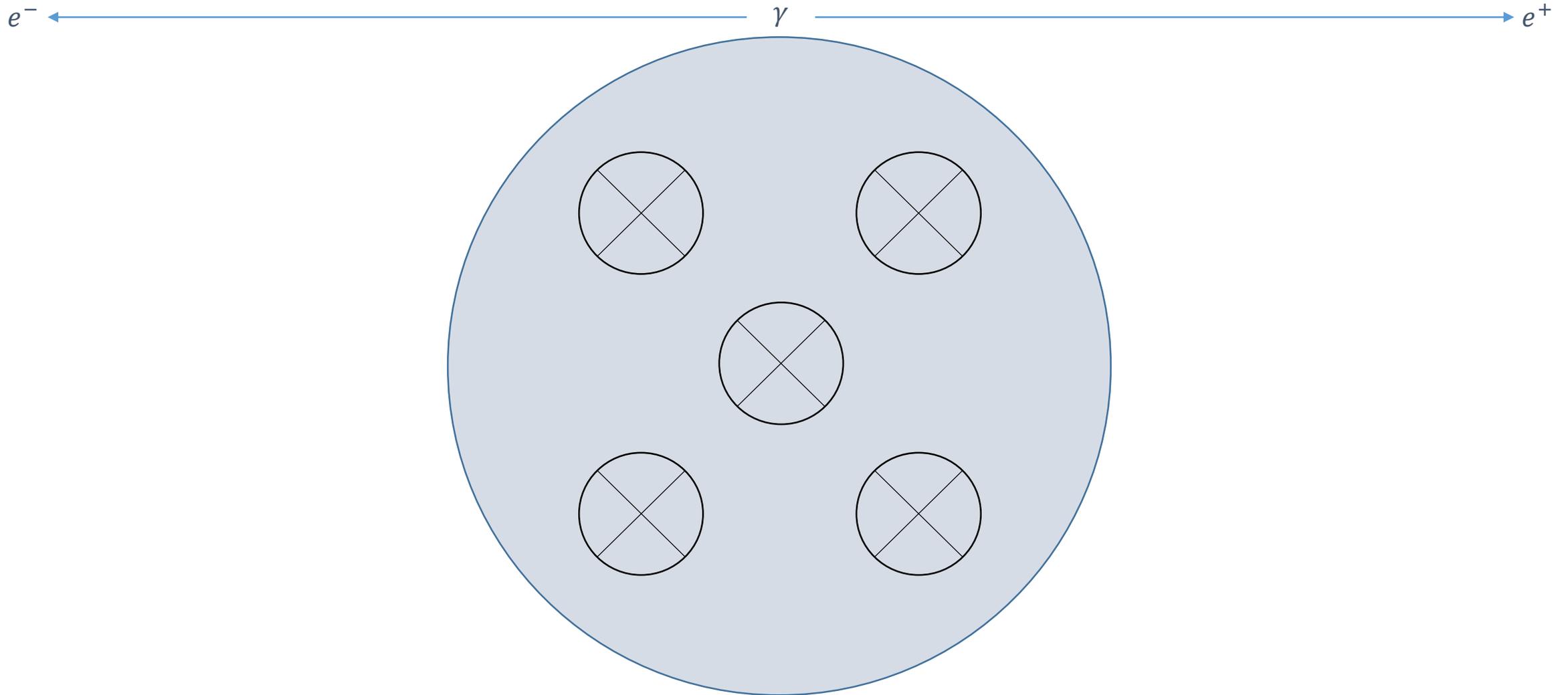
Andersons Nebelkammer



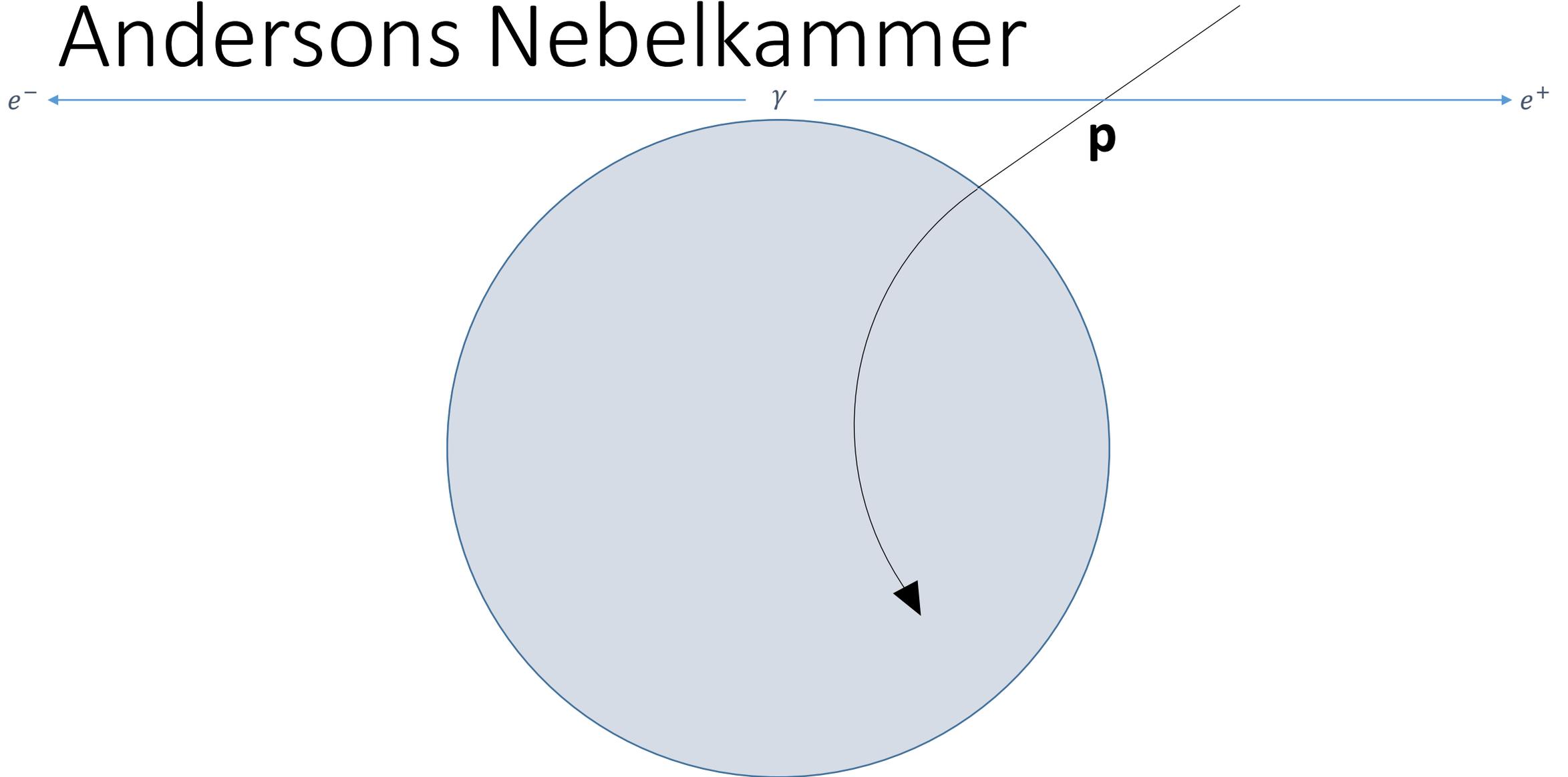
Andersons Nebelkammer



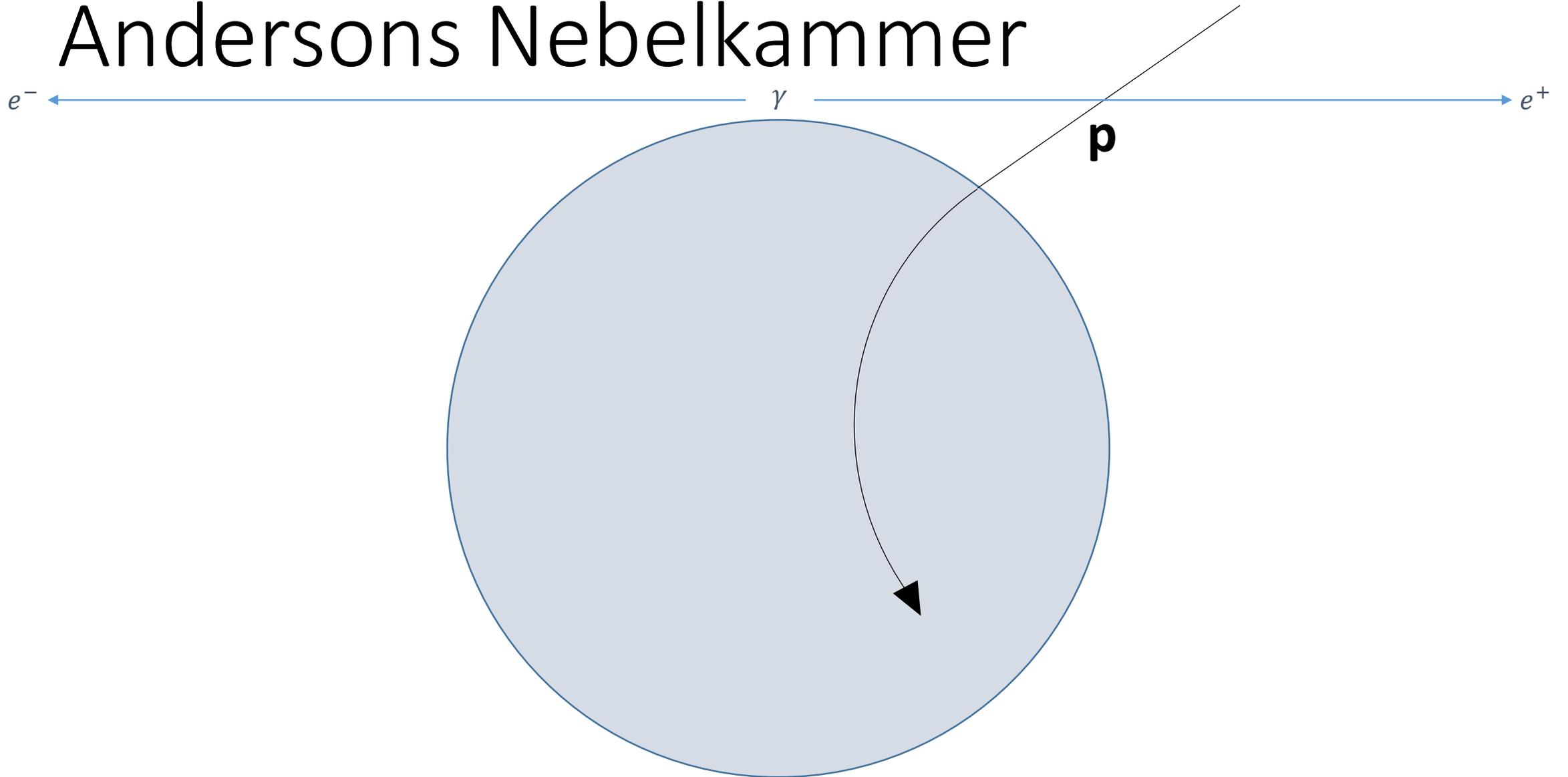
Andersons Nebelkammer



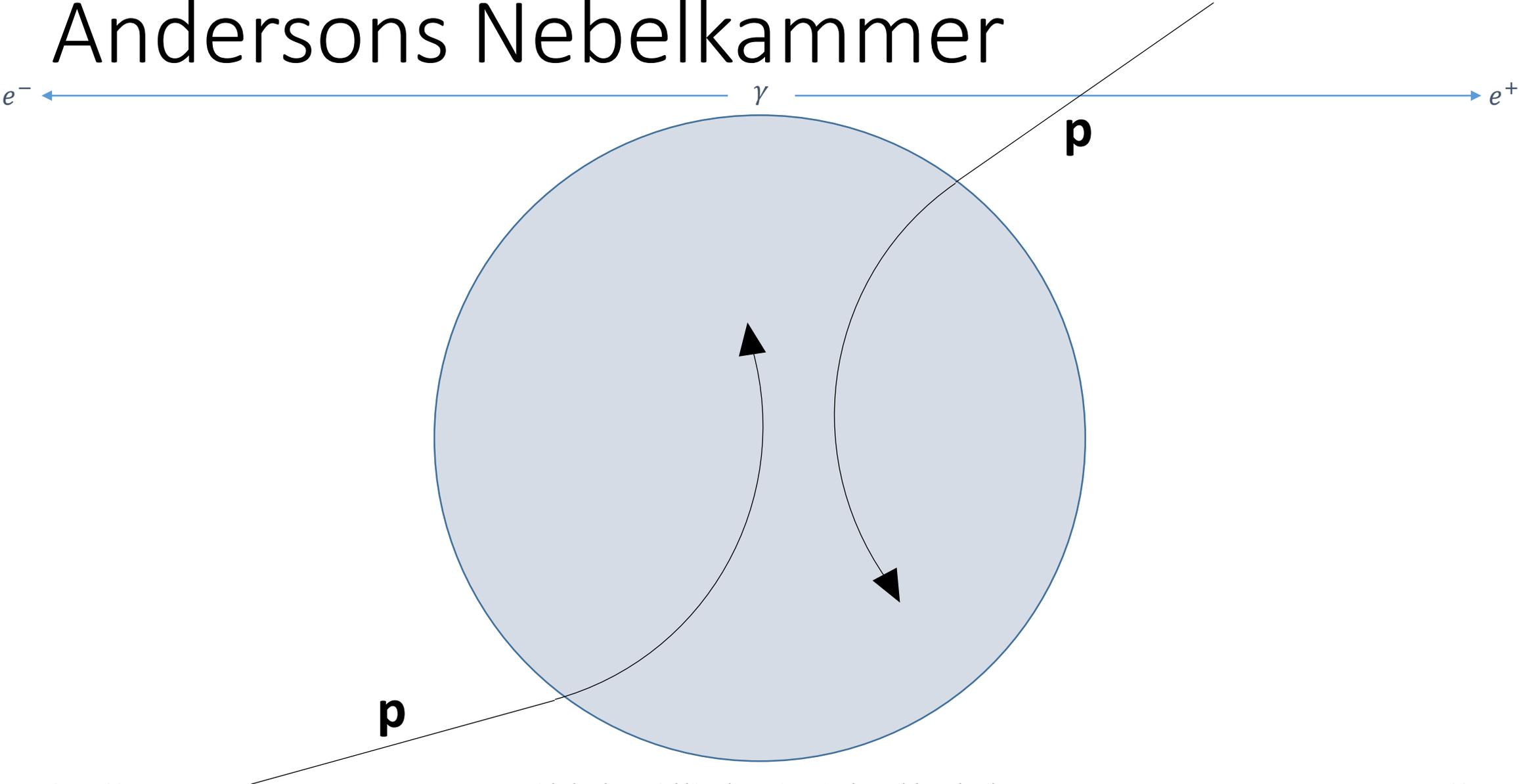
Andersons Nebelkammer



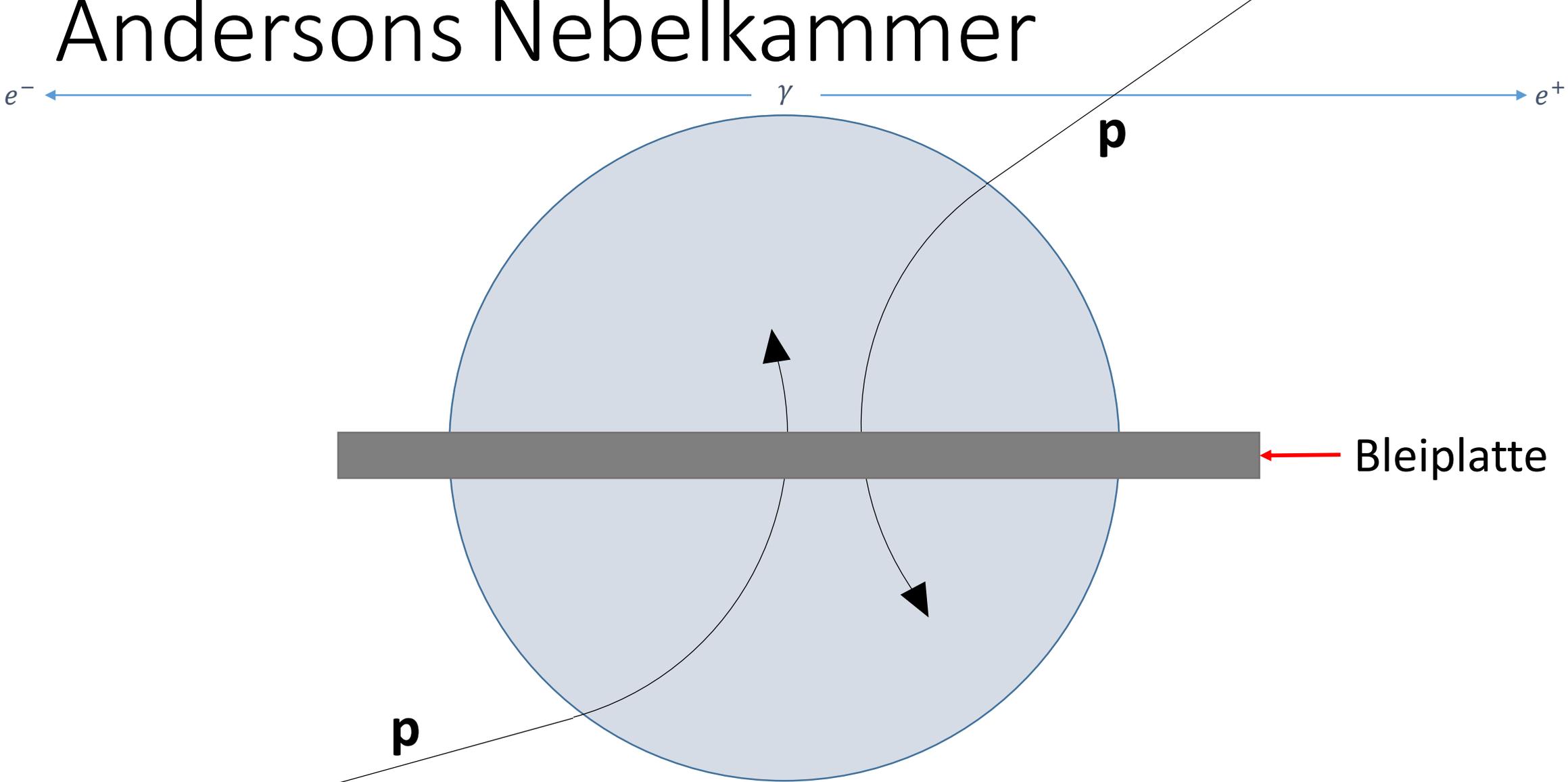
Andersons Nebelkammer



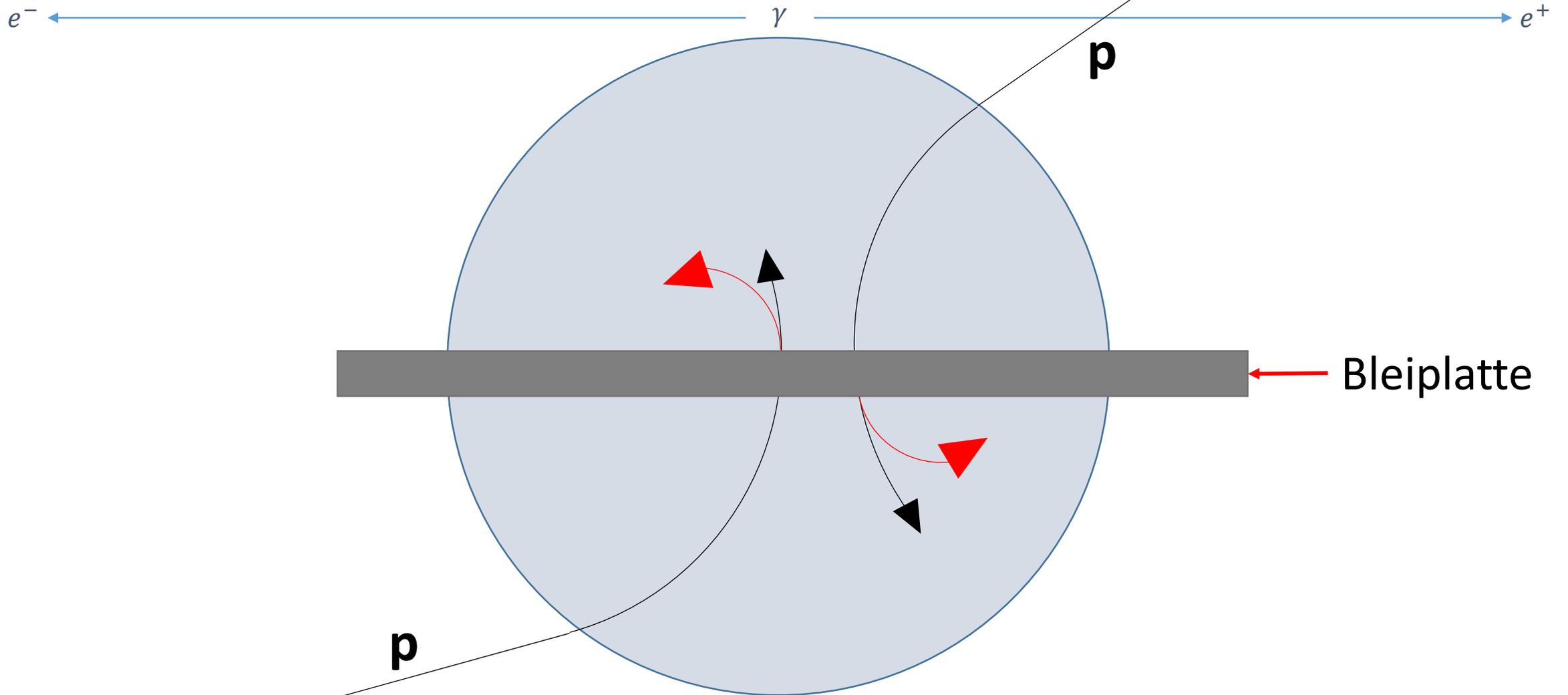
Andersons Nebelkammer



Andersons Nebelkammer



Andersons Nebelkammer



Andersons Nebelkammer



- Flugrichtung

➔ Bleiplatte

- Ionisationsstärke

➔ Tröpfchendichte

- Teilchenenergie

➔ Bahnradius

Teilchenenergie durch Bahnradius



- $F_L = F_{ZP}$ (7)

- $E = (\gamma - 1)mc^2$ (8)

- $E(r) = mc^2 \left(1 - \left(\frac{qBr}{mc} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}$ (9)

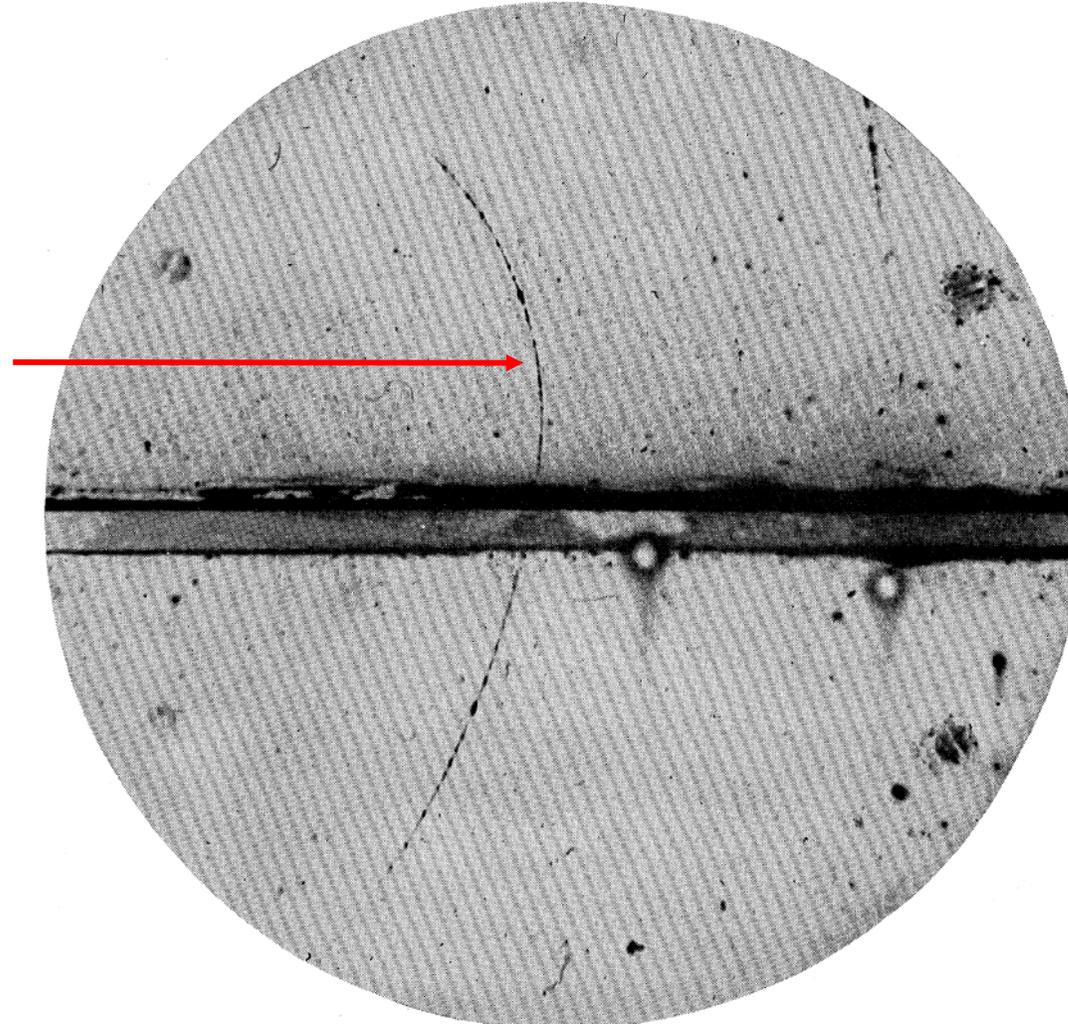
Entdeckung und Hypothesen



Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+

Abgelenktes
Teilchen

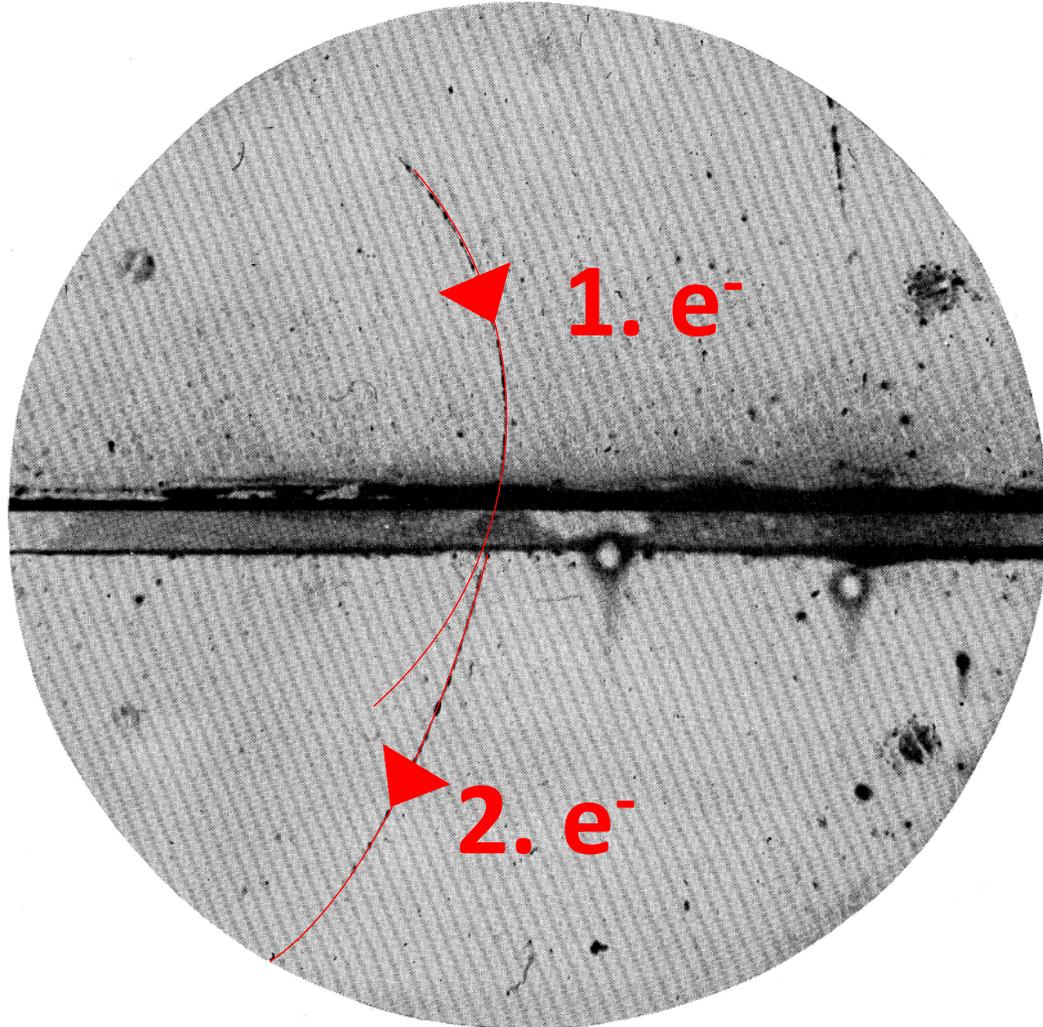


Bleiplatte

Ref. [1], Fig.1

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+

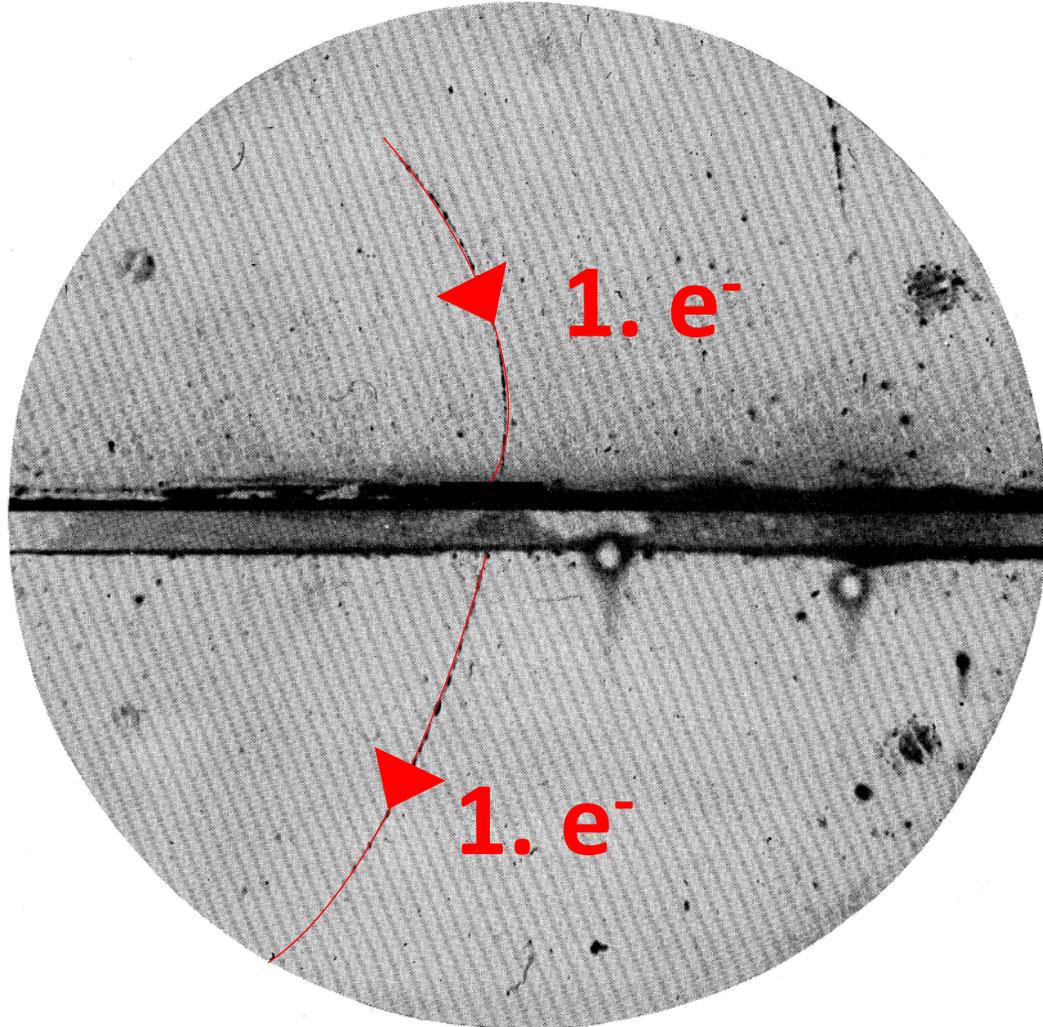


- Zwei unabhängige e^- ?

➡ *Statistisch unwahrscheinlich*

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+

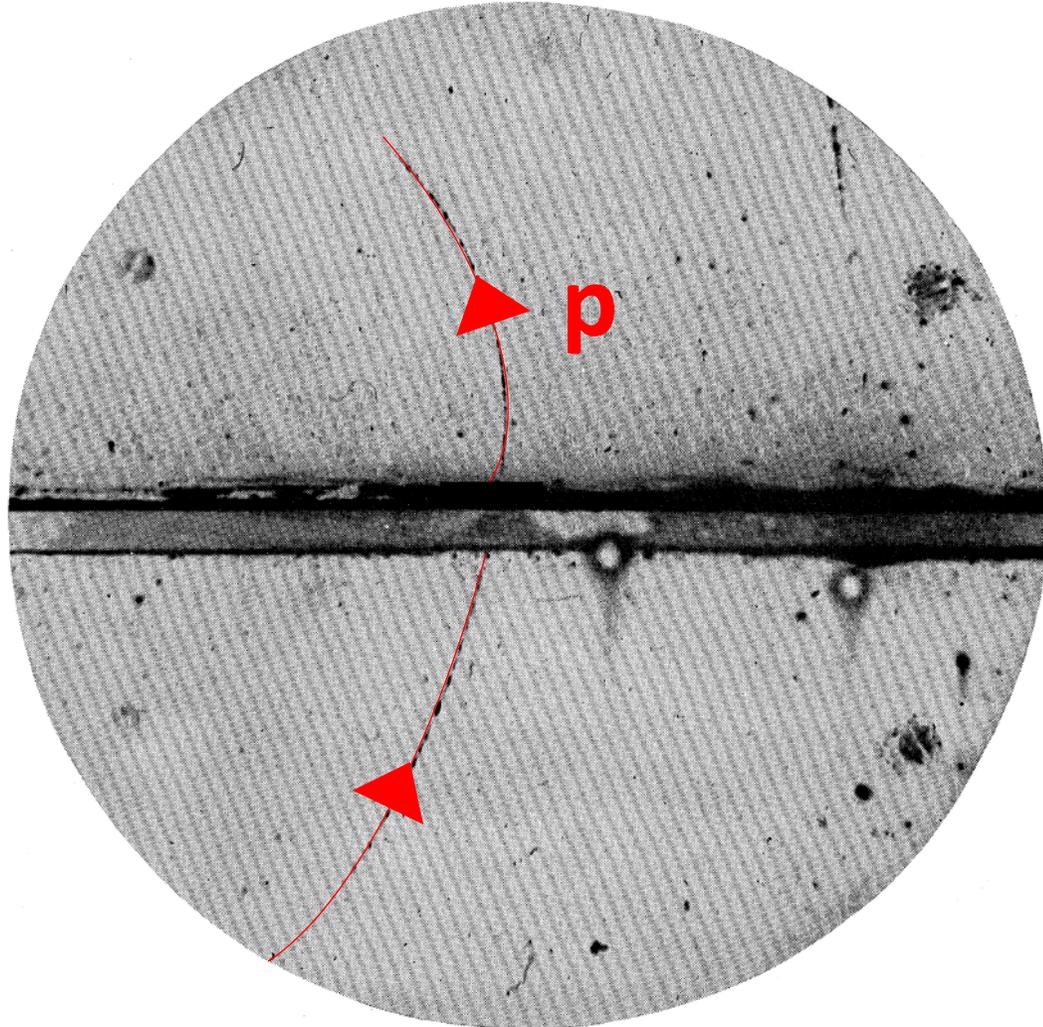


- Ein einziges e^- ?

➡ *Physikalisch unsinnig*

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+

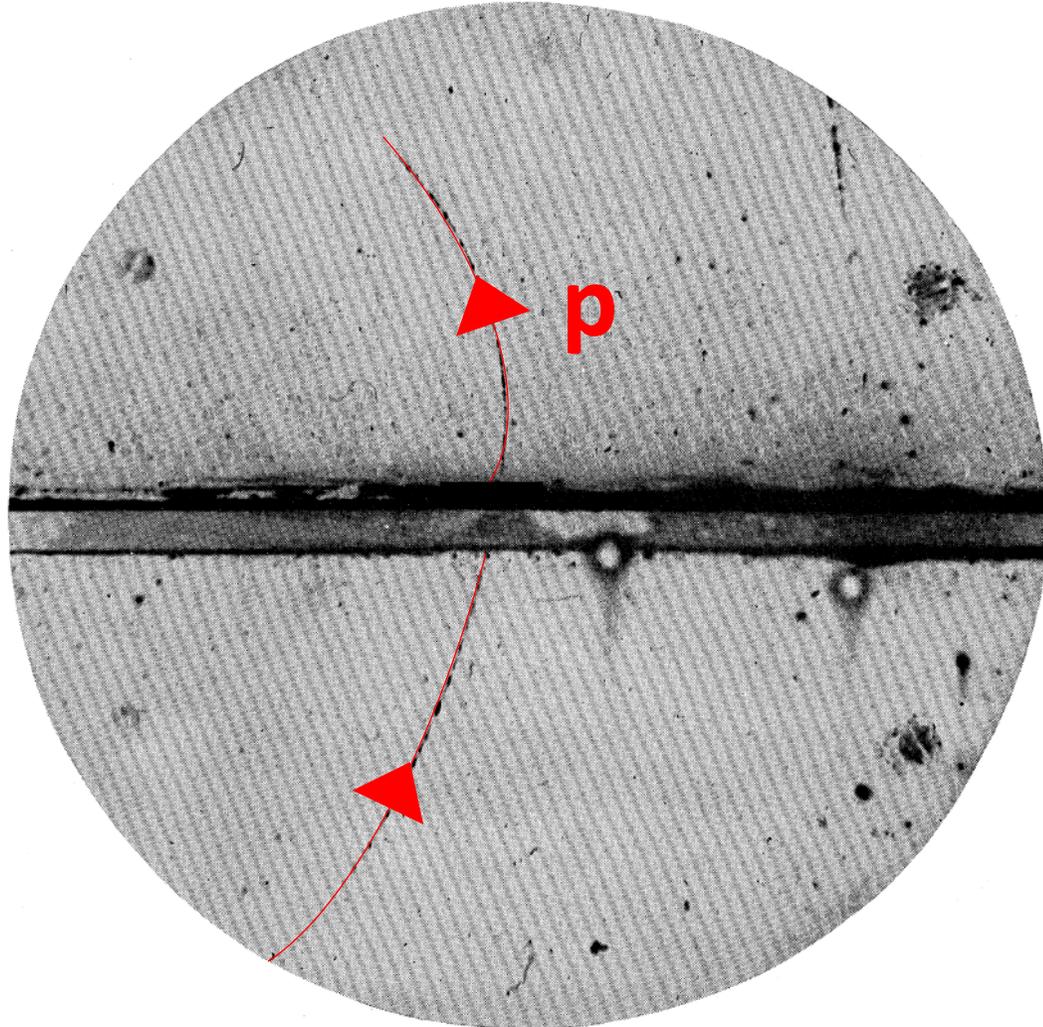


- Ein niederenergetisches Proton?

➡ *Wie hoch ist Energieverlust?*

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+



- Ein niederenergetisches Proton?

- ➔ *Energie Proton vor Bleiplatte: 0.3MeV (Ionisationströpfchen)*
- ➔ *Energieverlust beschrieben durch Bethe-Bloch Gleichung*

Ionisationsverlust in Materie

Bethe-Bloch Gleichung

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 * \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I*(1-\beta^2)} - \beta^2 \right) \quad (7)$$

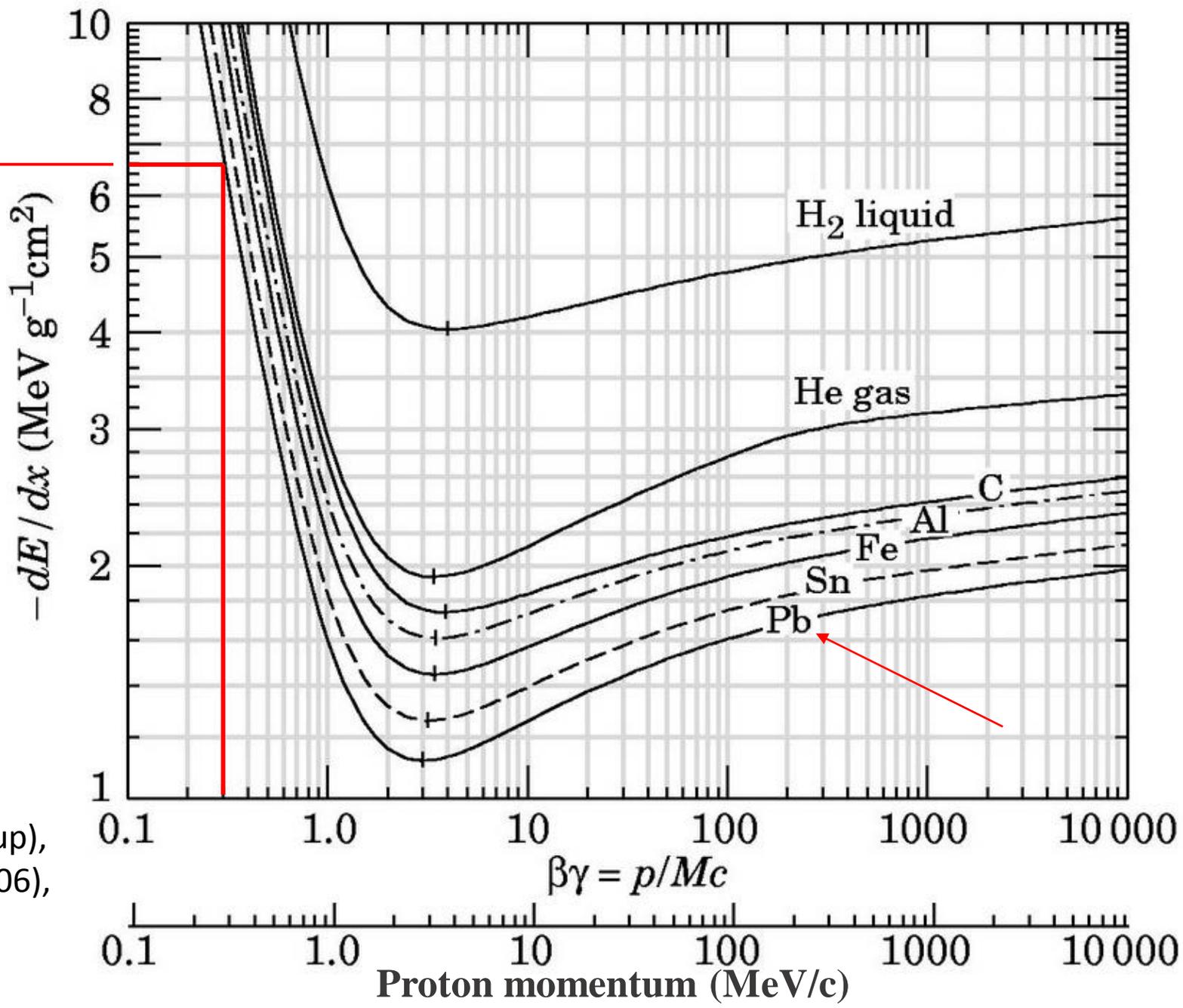
x = Weglänge

z = Ladungszahl

$n = \frac{Z*\rho}{A*u}$ = Elektronendichte

I = mittleres Anregungspotential

$6,6\text{MeV} \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$



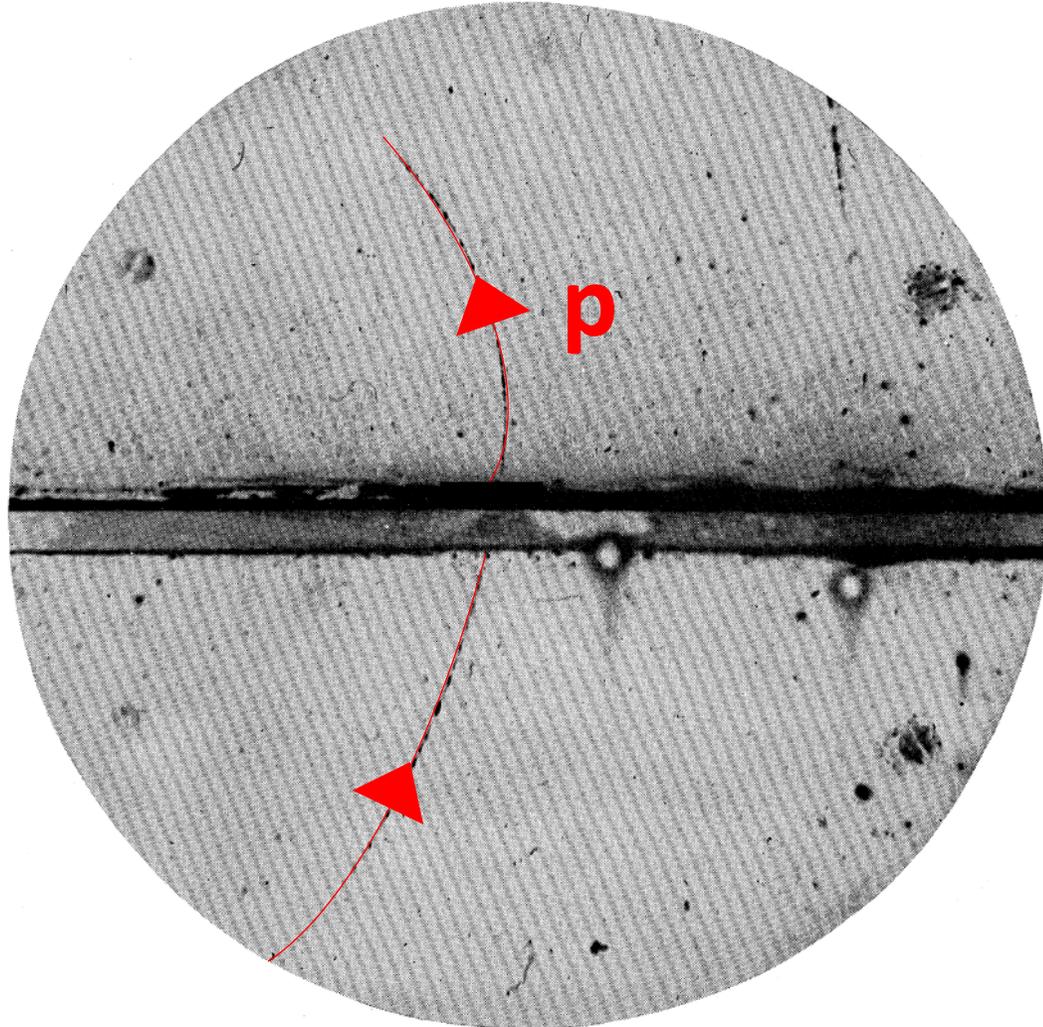
[W.-M. Yao et al.](#)
(Particle Data Group),
J. Phys. G**33**, 1 (2006),
Fig. 27.3

Energieverlust Proton in Blei

- $E_{in} = 0.3MeV$
- $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 6,6MeV \frac{g}{cm^2}$, $\rho_{Blei} = 11,342 \frac{g}{cm^3}$
- Energieverlust $\Delta E_{Bleiplatte} = 0.97MeV$

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+

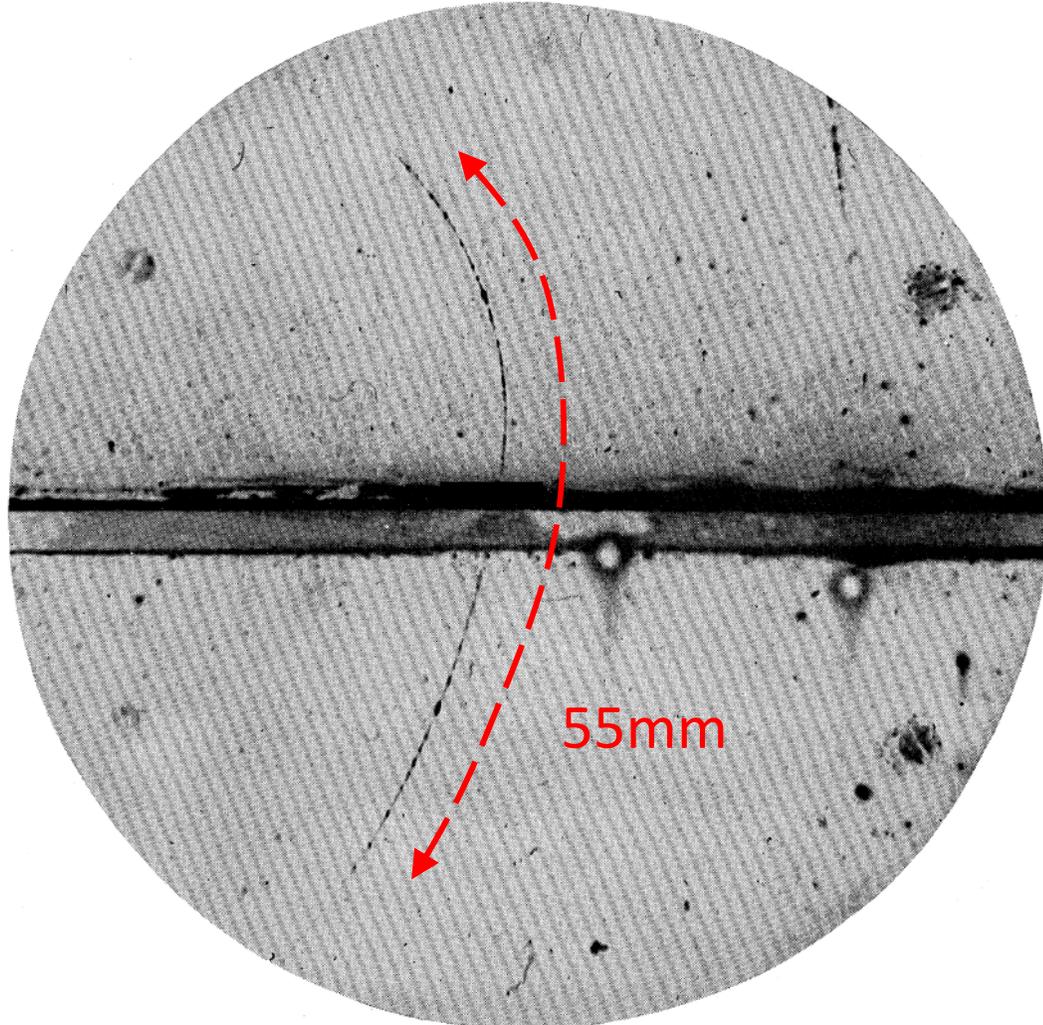


- Ein niederenergetisches Proton?

➔ *Proton würde in Platte absorbiert werden*

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+



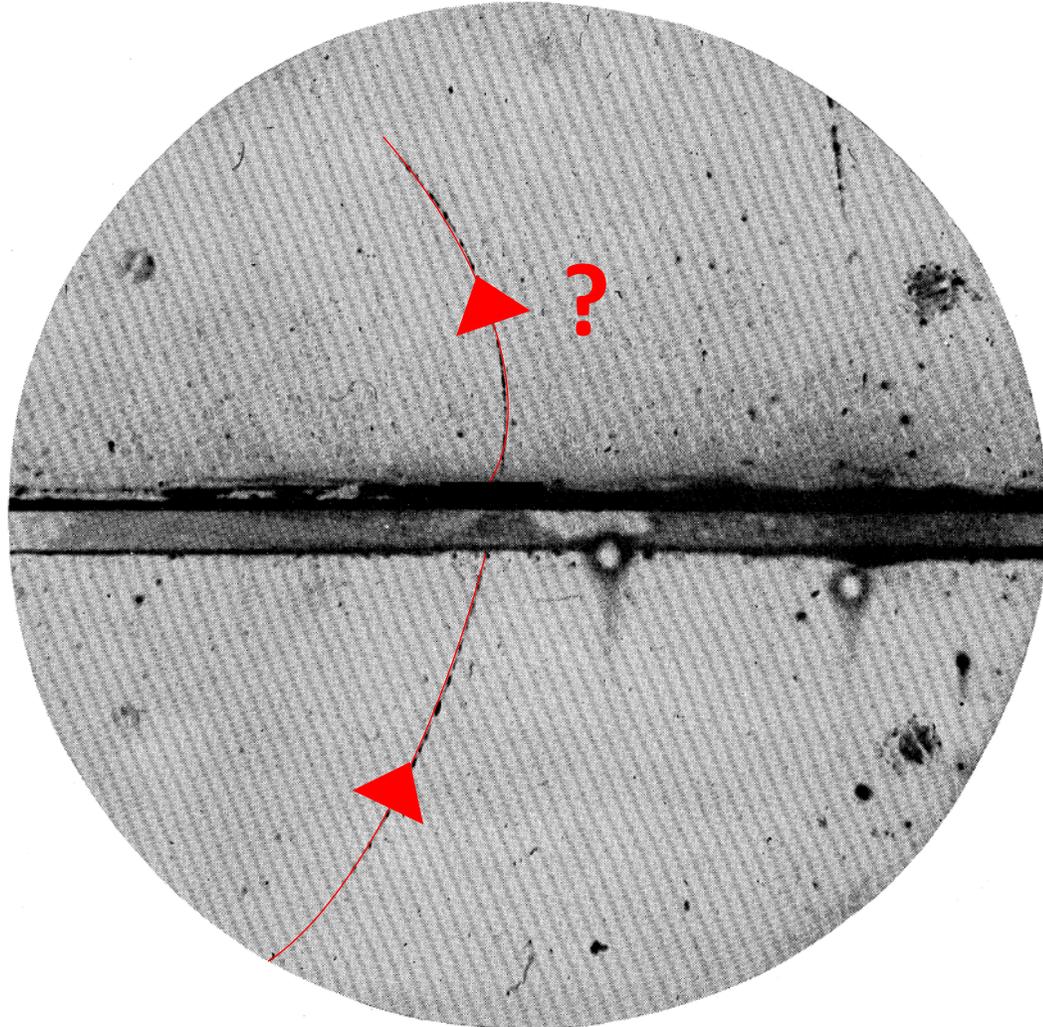
- Ein niederenergetisches Proton?

➡ *Proton würde in Platte absorbiert werden*

➡ *Proton hätte auch in Luft nur eine Reichweite von 5 mm*

Entdeckung und Hypothesen

e^- ← γ → e^+



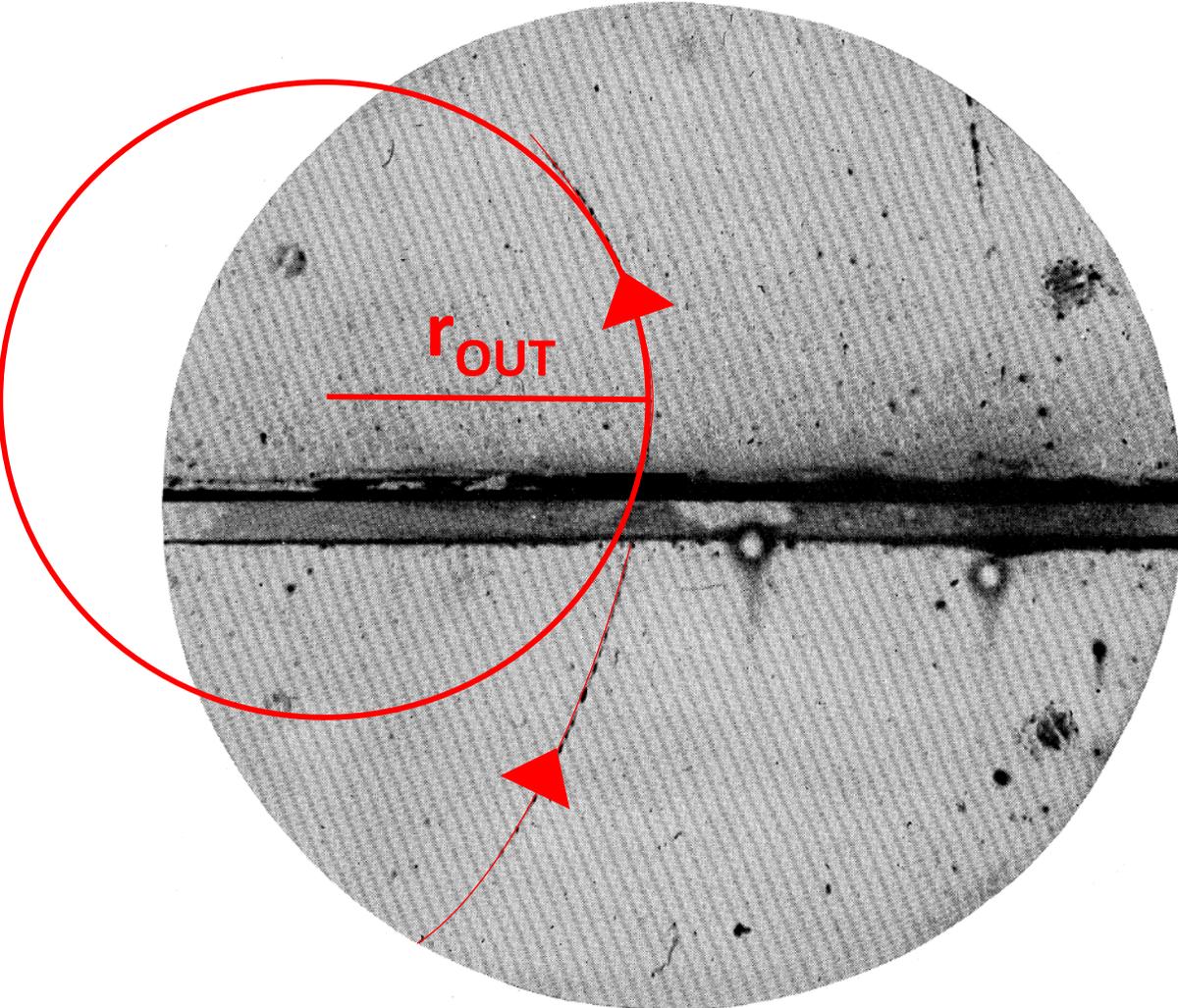
- Ein neues positiv geladenes Teilchen!

Eigenschaften des neuen Teilchens



Eigenschaften des neuen Teilchens

e^- ← γ → e^+

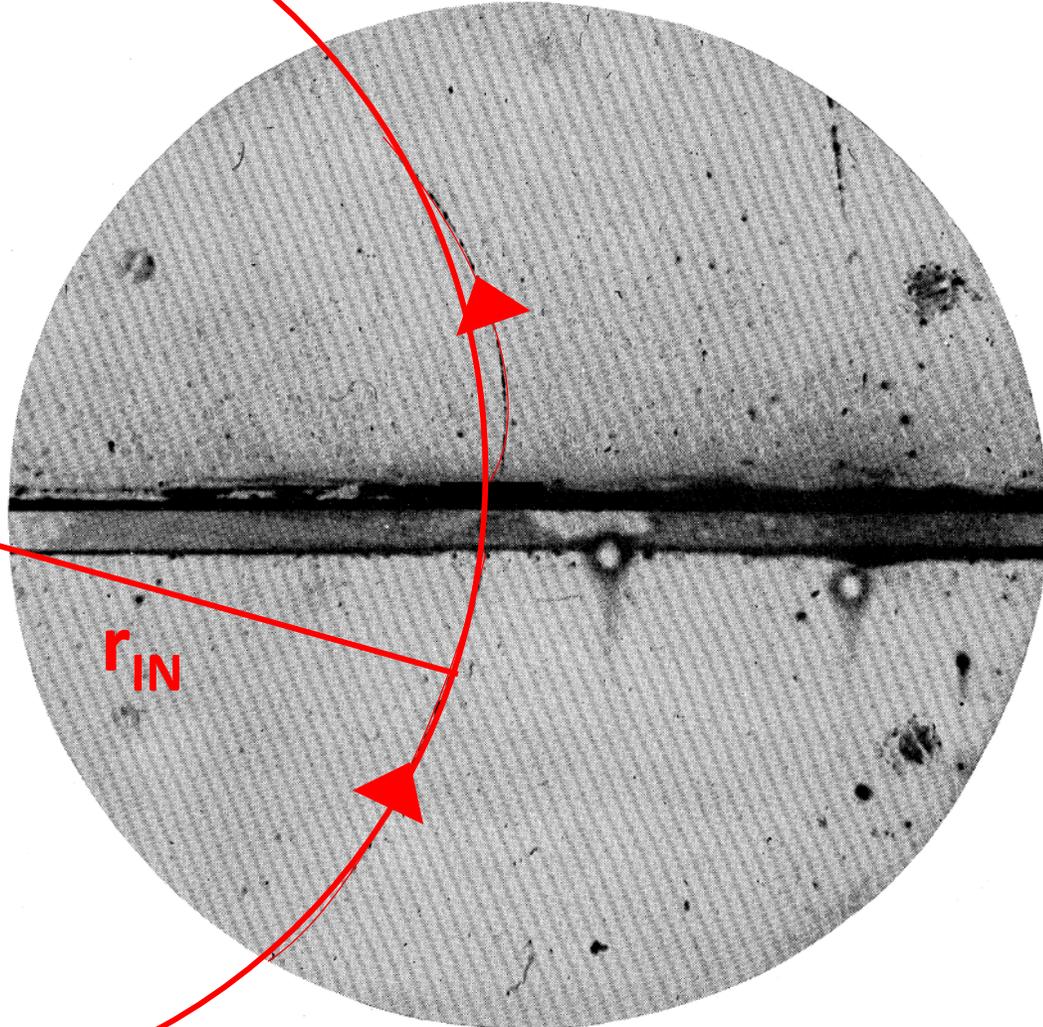


- Wie viel Energie verliert Teilchen in Blei?

➔ *Energie durch Bahnradius*

Eigenschaften des neuen Teilchens

e^- ← γ → e^+

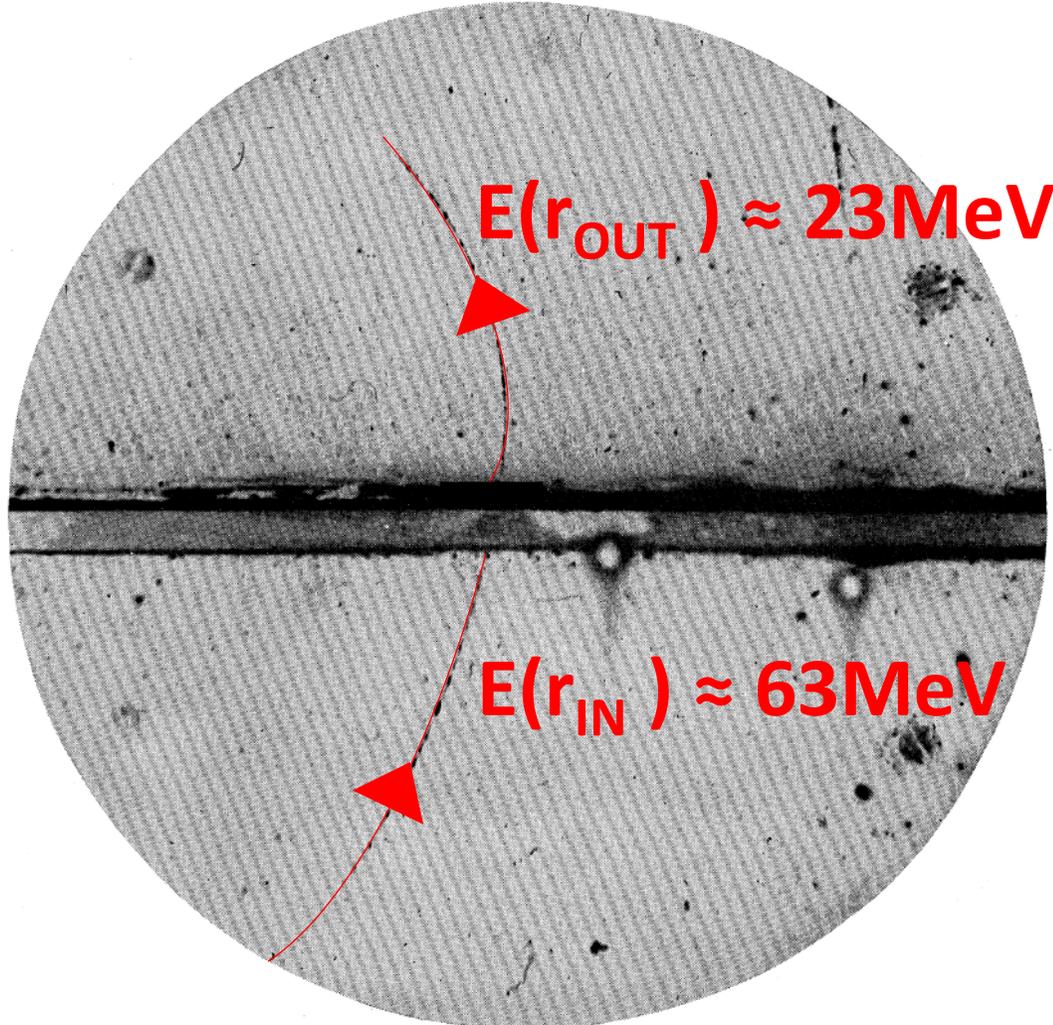


- Wie viel Energie verliert Teilchen in Blei?

➔ *Energie durch Bahnradius*

Eigenschaften des neuen Teilchens

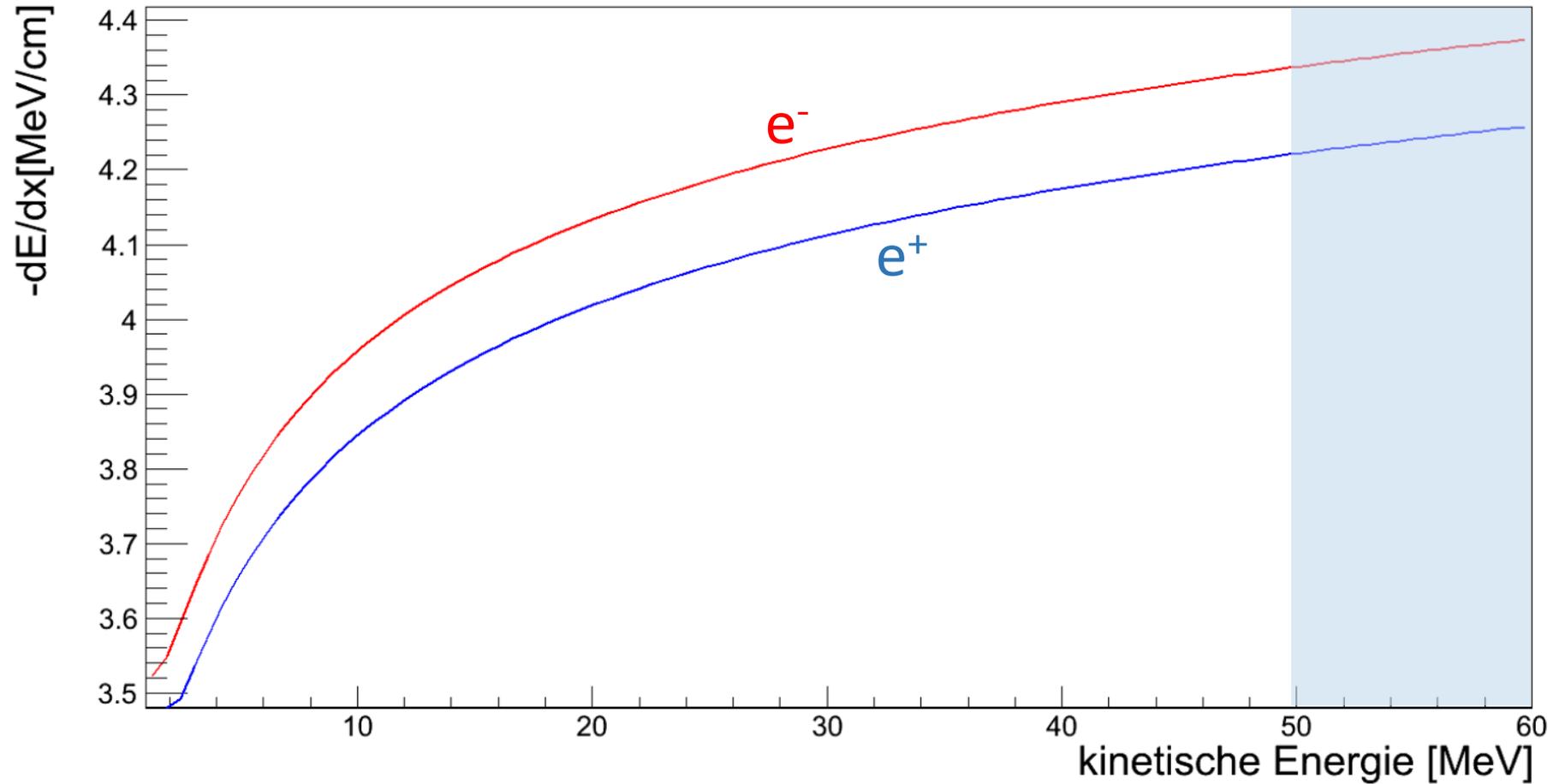
e^- ← γ → e^+



- Wie viel Energie verliert Teilchen in Blei?

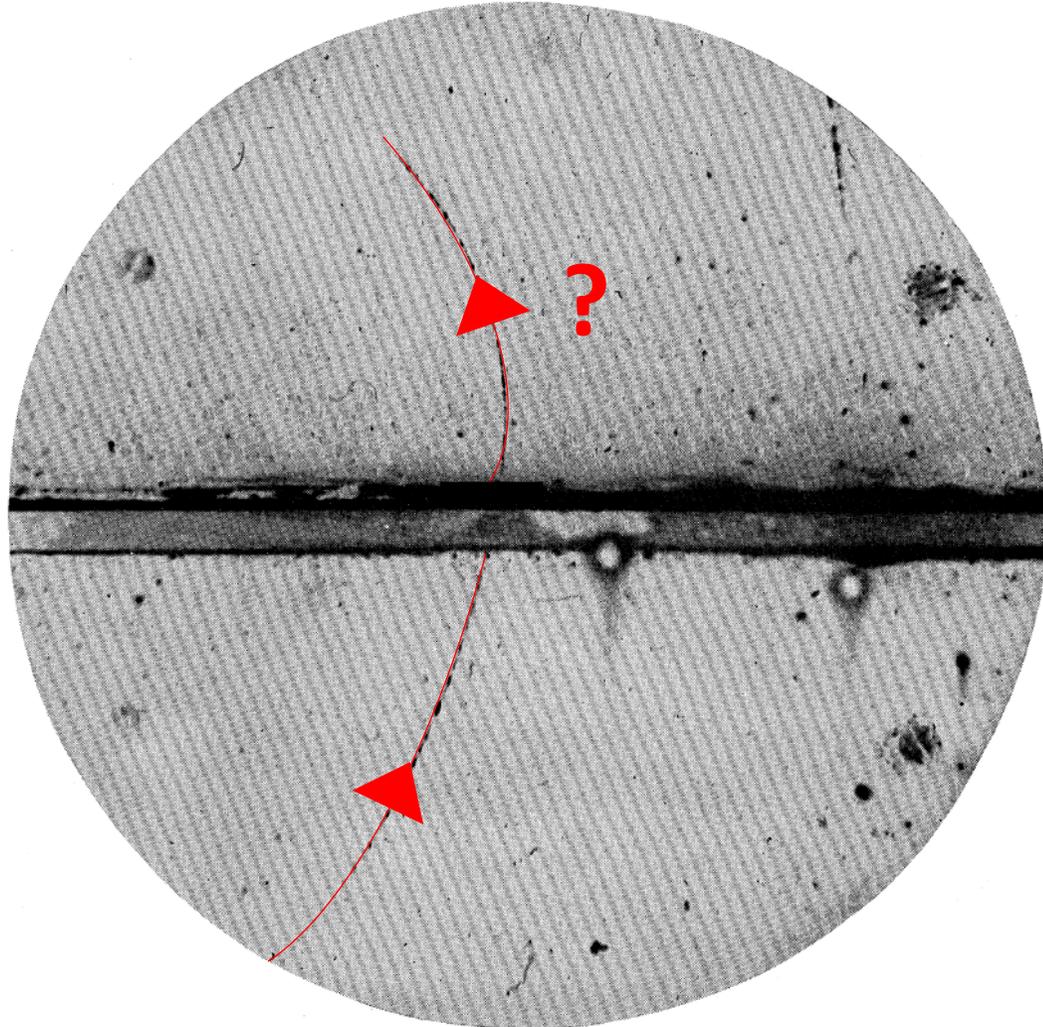
➔ *Energie durch Bahnradius*

Eigenschaften des neuen Teilchens



Eigenschaften des neuen Teilchens

e^- ← γ → e^+



- Wie viel Energie verliert Teilchen in Blei?

➔ *Energiedifferenz zu e^- vernachlässigbar für $E > 60\text{MeV}$*

Eigenschaften des neuen Teilchens



- Annahme: Teilchenmasse \approx Elektronenmasse
- ➔ Energieverlust nach Bethe-Bloch $\approx 38\text{MeV}$
- ➔ Stimmt überein mit Tröpfchenbestimmung der Energien
- ➔ Energieverlust Elektronen ($E_{IN} = 200\text{-}300\text{MeV}$) in Bleiplatte $\approx 35\text{MeV}$

Eigenschaften des neuen Teilchens



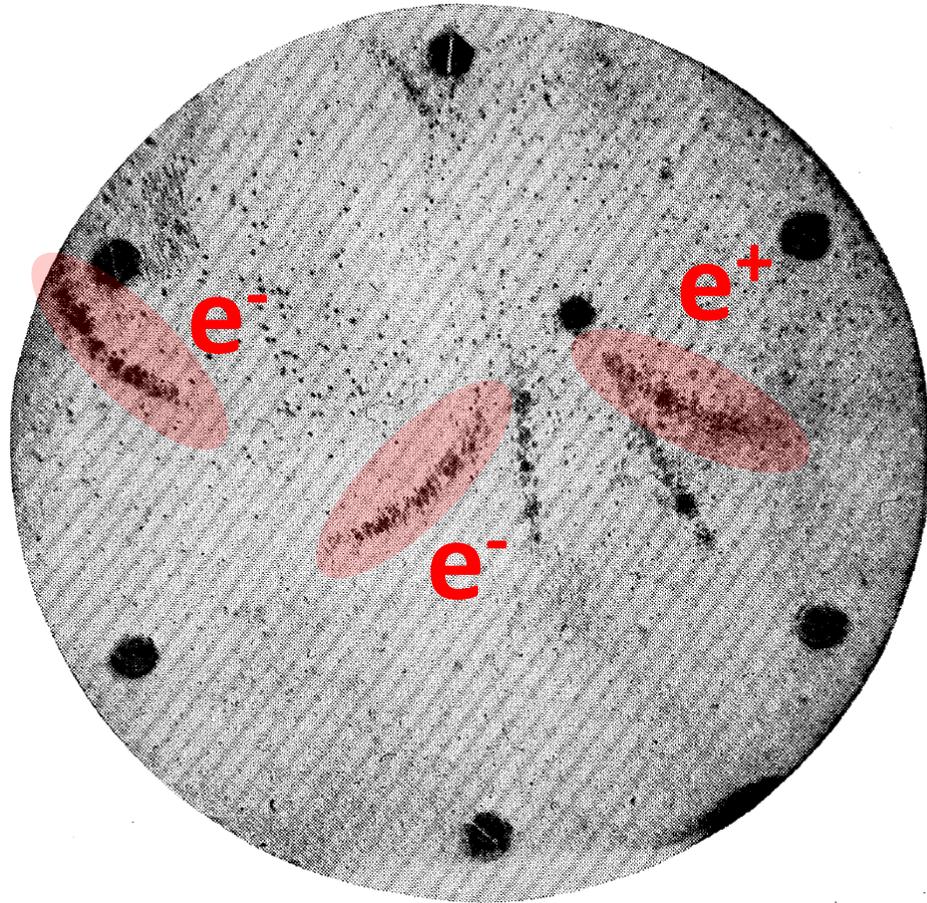
$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{e^+} \leq -4 \frac{dE}{dx} \Big|_{e^-} \quad (8)$$

$$-\frac{dE}{dx} \sim Z^2 \quad (9)$$

$$\Rightarrow e^+ \leq 2e^-$$

Eigenschaften des neuen Teilchens

e^- ← γ → e^+



- Vergleich mit Elektronenspuren

➔ $m_{e^+} \leq 20 m_{e^-}$

- Weiter Messungen für genauere Massebestimmung

Eigenschaften des neuen Teilchens



- Ladung: $e^+ \leq 2e^-$

- Masse: $m_{e^+} \leq 20 m_{e^-}$

➔ 15 aus 1300 Aufnahmen bestätigen diese Eigenschaften

➔ Übereinstimmung mit Diracs Postulat

➔ **Neues Teilchen ist Positron**

Kritische Anmerkung

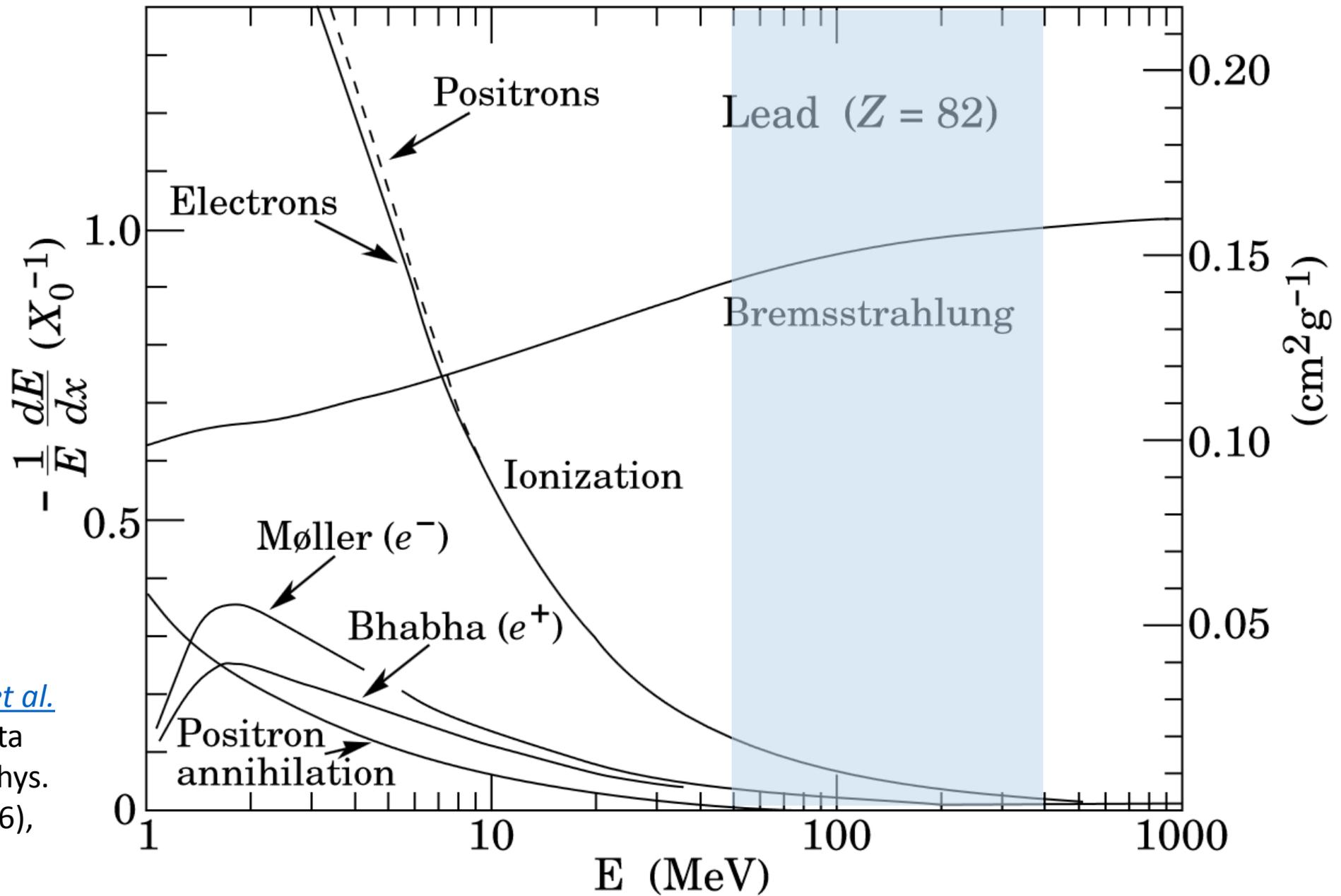


Kritische Anmerkung



- Massen- und Ladungsabschätzung berücksichtigen nur Ionisationsverluste

[W.-M. Yao et al.](#)
 (Particle Data
 Group), J. Phys.
G33, 1 (2006),
 Fig. 27.10



Kritische Anmerkung



- Massen- und Ladungsabschätzung berücksichtigen nur Ionisationsverluste
- Hauptsächliche Ursache ist Bremsstrahlung

$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{\text{Bremsstrahlung}} = \frac{E}{X_0} \quad (10)$$

X_0 = Strahlungslänge

Nobelpreis 1936

e^- ← ————— γ ————— → e^+

Victor Franz Hess



*„...for his
discovery of
cosmic
radiation...“*



Carl David Anderson

*„...for his
discovery of
the
positron...“*

Standardmodell

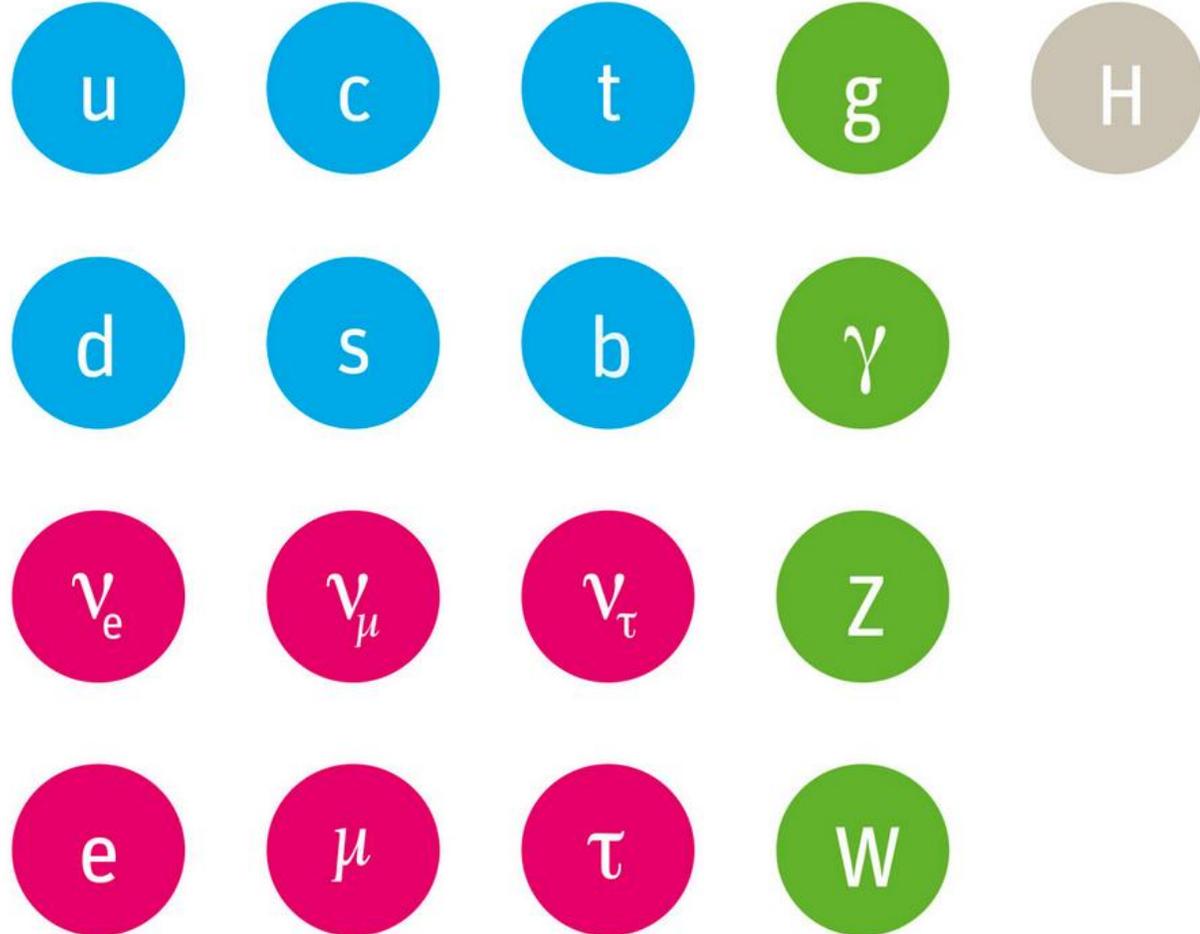
e^- ← γ → e^+

● Quarks

● Leptonen

● Kraftteilchen

● Higgs



Referenzen



1. C.D. Anderson: *The Positive Electron*. In: *Physical Review*, Vol. 43 (Mar. 15, 1933)
2. P.A.M. Dirac: *The Quantum Theory of the Electron*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. A, Nr. 778, 1928, S. 610-624
3. B.M. Cwilong: *Sublimation in a Wilson Chamber*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 190, No. 1020 (Jun. 17, 1947), pp. 137-143
4. E. Fermi: *On the Origin of the Cosmic Radiation*. In: *Physical Review*, Vol. 75, No. 8 (Apr. 15, 1949)
5. R.A. Mewaldt, 2010. ["Cosmic Rays"](#). California Institute of Technology.
6. C.D. Anderson, *The production and properties of positrons*, Nobel Lecture, 1936
7. C.T.R. Wilson: *On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. A, Nr. 87, 1912
8. R.L. William: *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, Springer, 1987
9. C. Augustin: *Charakterisierung von HV-Maps*, 2012

