

Klassische Physik 1

Johannes Blümer

WS 2014/15

V19 8.1.15

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



1. Einführung

- 1.1. Was ist Physik?
- 1.2. Physikalische Größen und Einheiten
- 1.3. Messungen, Datenauswertung, Fehler

2. Klassische Mechanik

- 2.1. Kinematik der Massenpunkte
- 2.2. Dynamik der Massenpunkte
- 2.3. Systeme von Massenpunkten
- 2.4. Rotation

3. Gravitation

- 3.1. Gravitationsgesetz
- 3.2. Feld und Potential

3.3. Planetenbahnen: Kepler

3.4. Massenverteilungen

3.5. Dunkle Materie

4. Relativistische Mechanik

- 4.1. Bezugssysteme und Transformationen
- 4.2. Spezielle Relativitätstheorie
- 4.3. Relativistische Kinematik

5. Feste Körper und Flüssigkeiten

5.1. Feste Körper

5.2. Hydrostatik und Hydrodynamik

6. Schwingungen und Wellen

6.1. Schwingungen

6.2. Wellen

Zusammenfassung v18. Relativität

Lichtgeschwindigkeit ist endlich und in jedem Inertialsystem gleich

→
O. Römer, Jupitermonde
Foucault, Fizeau, Zahnräder
Gerthsen-Demo: direkte Zeitmessung

I.S. ist ein Bezugssystem, in dem 'Newton I' gilt.

Myonen der kosmischen Strahlung:

- Produktion in ~ 10 km Höhe
- Lebensdauer in Ruhe: $\tau \approx 2\mu\text{s}$

Michelson-Morley - Interferometer + Erweiterungen)

↙ kann Bewegungen des I.S. nicht feststellen

Galilei-Transformation: " $t = t'$ "

Olaf Römer 1644-1710



~ unveröffentlicht
min. Aussage:

$$C < \infty$$

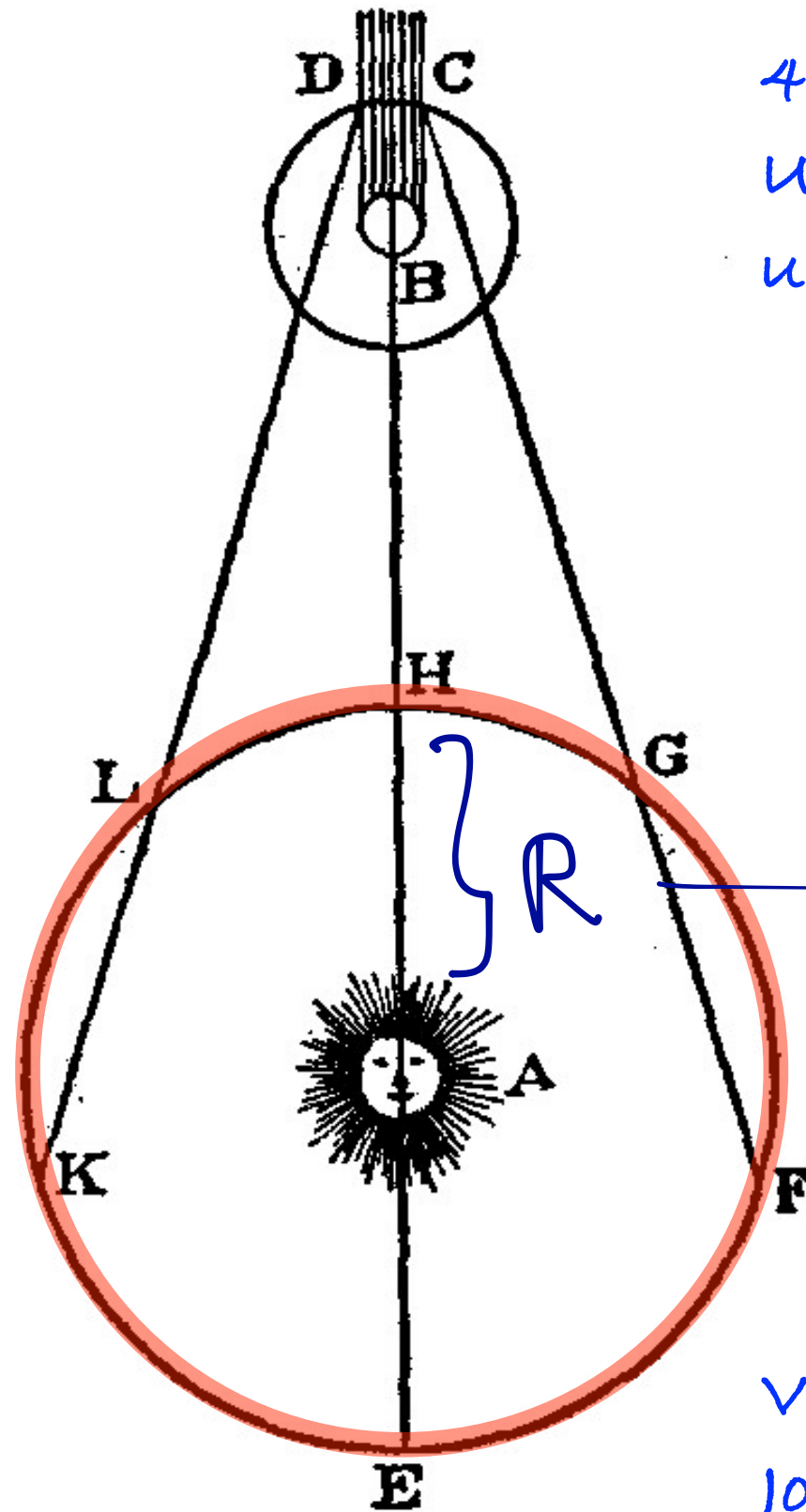


FIG. 70.

42 Std. pro
Umlauf von Jo
um Jupiter

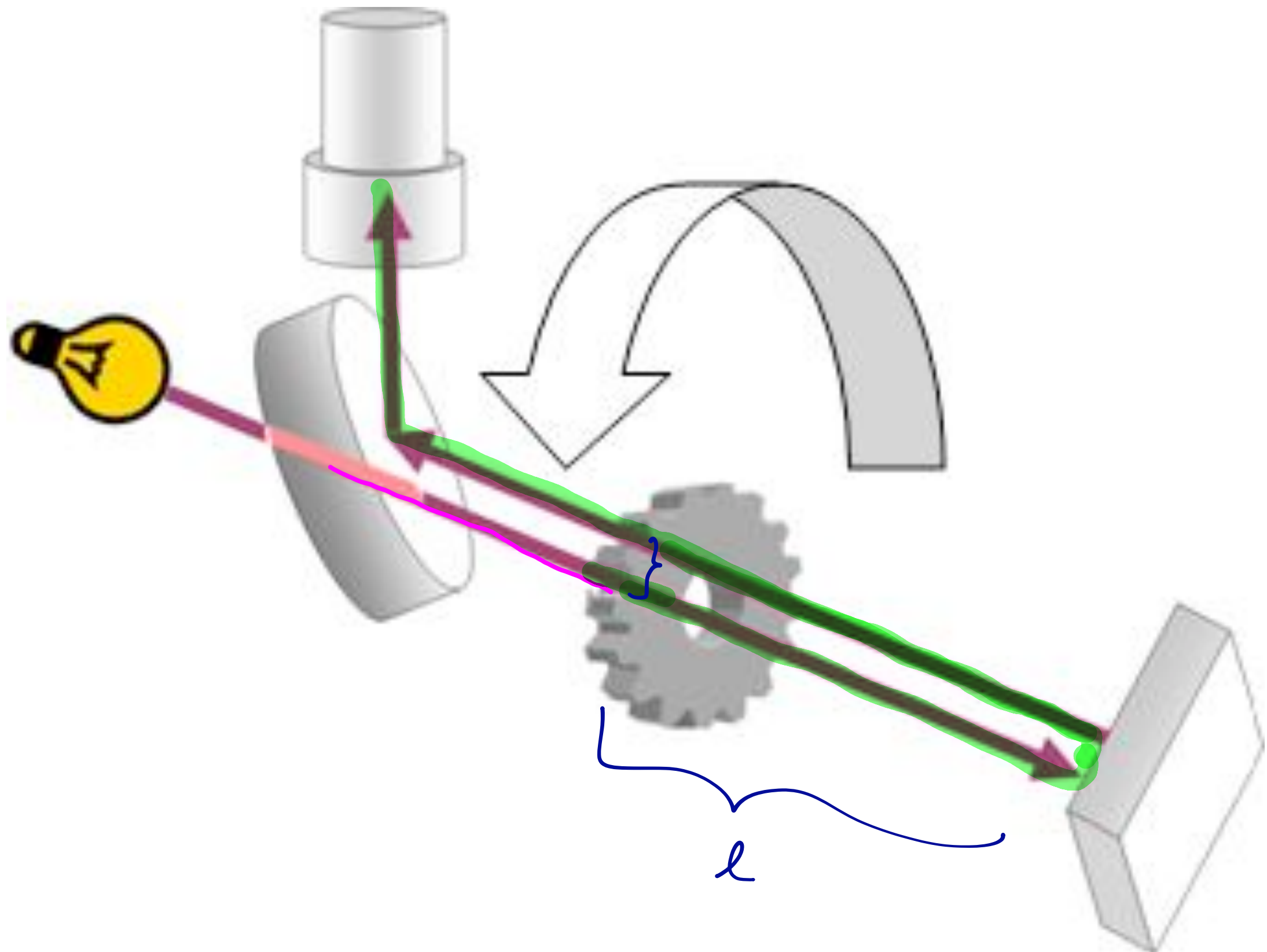
$$C = \frac{2R}{\Delta t}$$

Radius der
Erdbahn

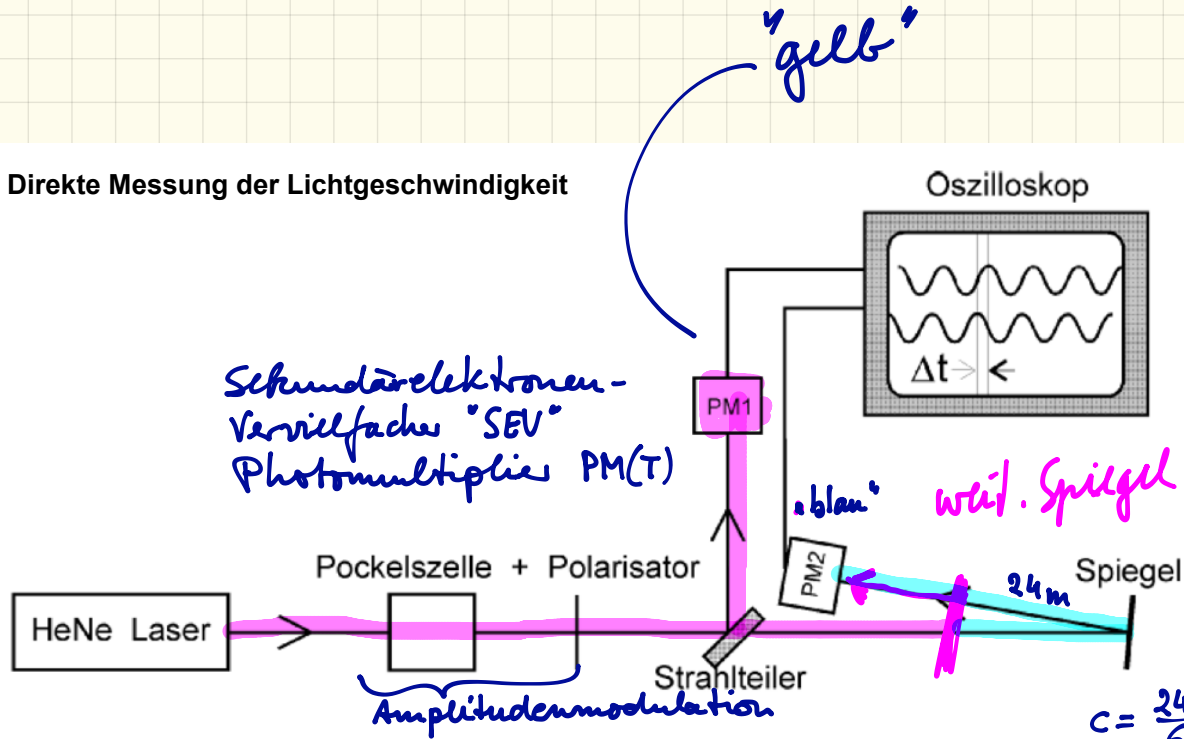
$$C \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

Von E aus verschwindet
Jo 15 Minuten später als
vorausgesagt bzgl. H

Fizeau-Experiment zur Messung der Lichtgeschwindigkeit

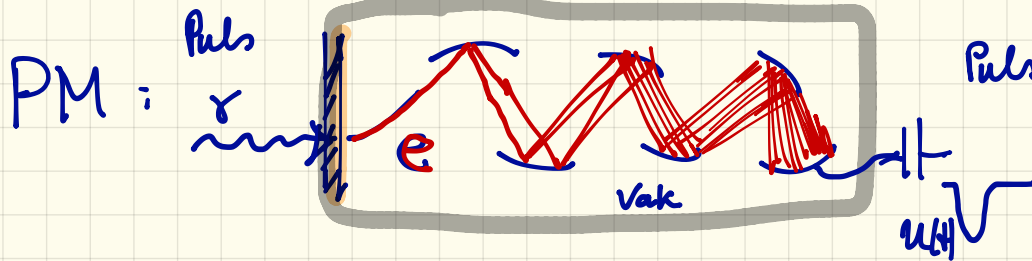


Direkte Messung der Lichtgeschwindigkeit



$$c = \frac{24 \text{ m}}{68 \text{ ns}} = 353000 \text{ km/s}$$

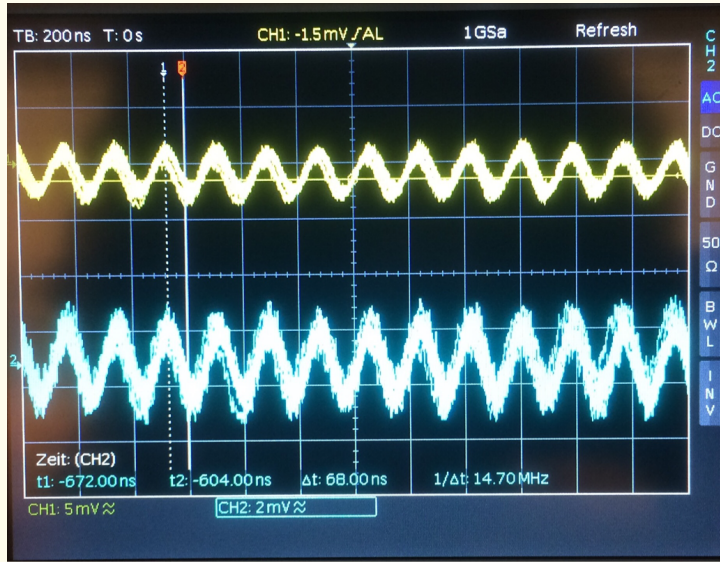
naja... ✓



↳ Photos

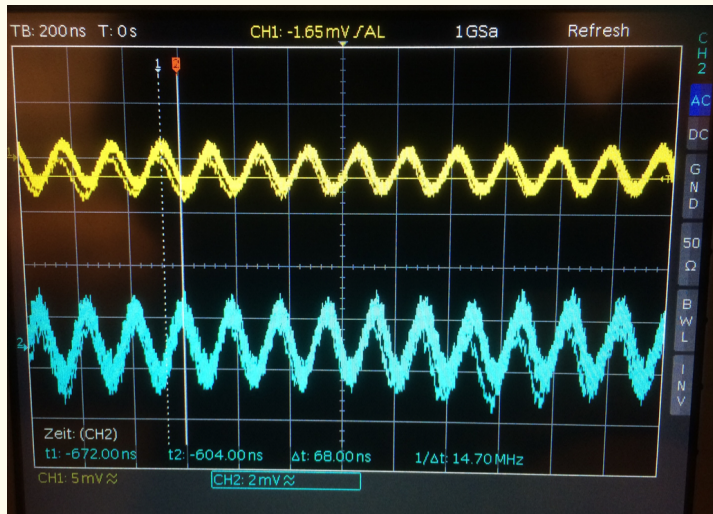
lichtwege zu PM1, PM2 fast gleich:

im
Phase



lichtweg zu PM2 ca 24m länger:

blau
ist um
68 ns
verzögert



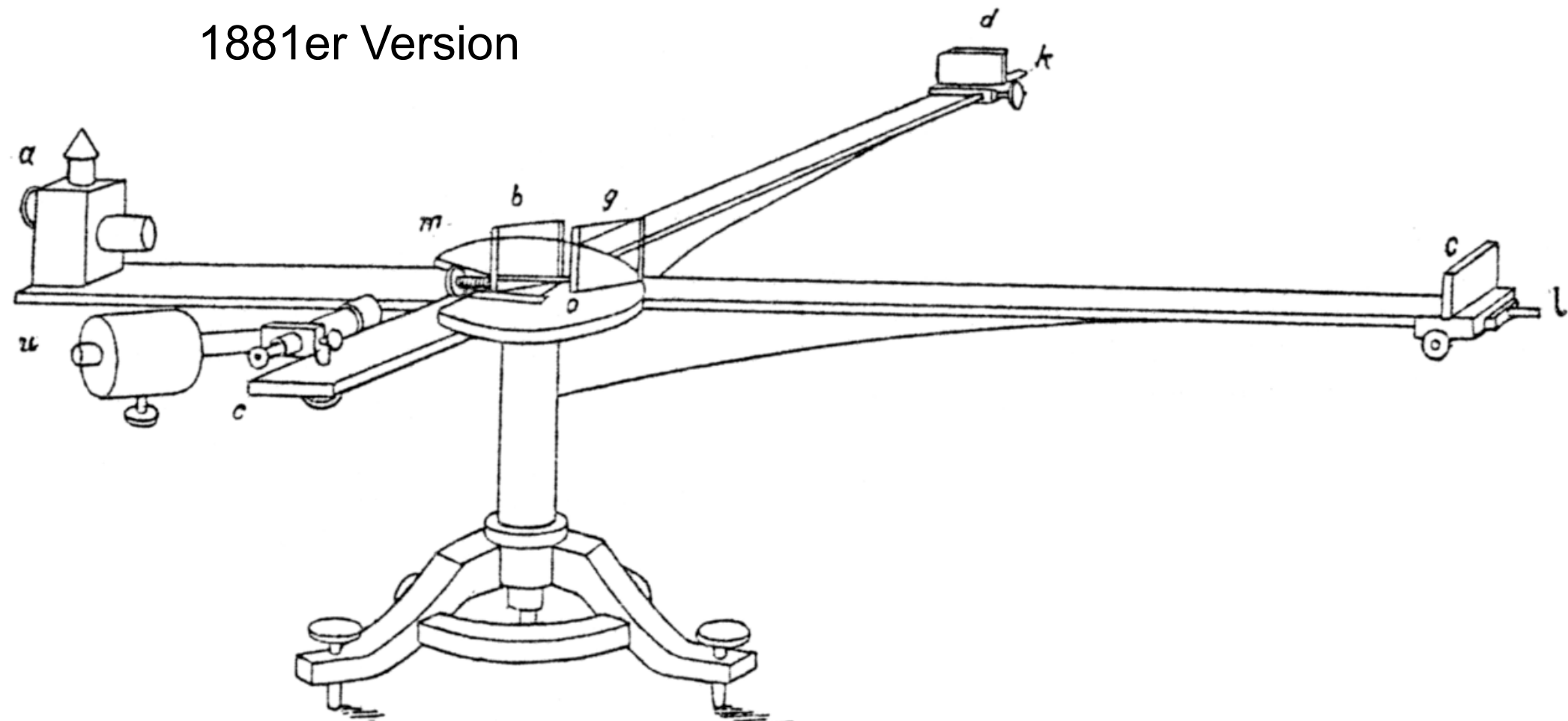


A.A. Michelson
1852 - 1931



E.W. Morley
1838 - 1923

1881er Version





3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* *von A. Einstein.*

Daß die **Elektrodynamik Maxwells** — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die **elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter**. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

892

A. Einstein.

Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanze. Diese beiden Voraussetzungen genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen unter Zugrundelegung der Maxwellschen Theorie für ruhende Körper. Die Einführung eines „Lichtäthers“ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter „absolut ruhender Raum“ eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird.

Die zu entwickelnde Theorie stützt sich — wie jede andere

Die zu entwickelnde Theorie stützt sich — wie jede andere Elektrodynamik — auf die Kinematik des starren Körpers, da die Aussagen einer jeden Theorie Beziehungen zwischen starren Körpern (Koordinatensystemen), Uhren und elektromagnetischen Prozessen betreffen. Die nicht genügende Berücksichtigung dieses Umstandes ist die Wurzel der Schwierigkeiten, mit denen die Elektrodynamik bewegter Körper gegenwärtig zu kämpfen hat.

I. Kinematischer Teil.

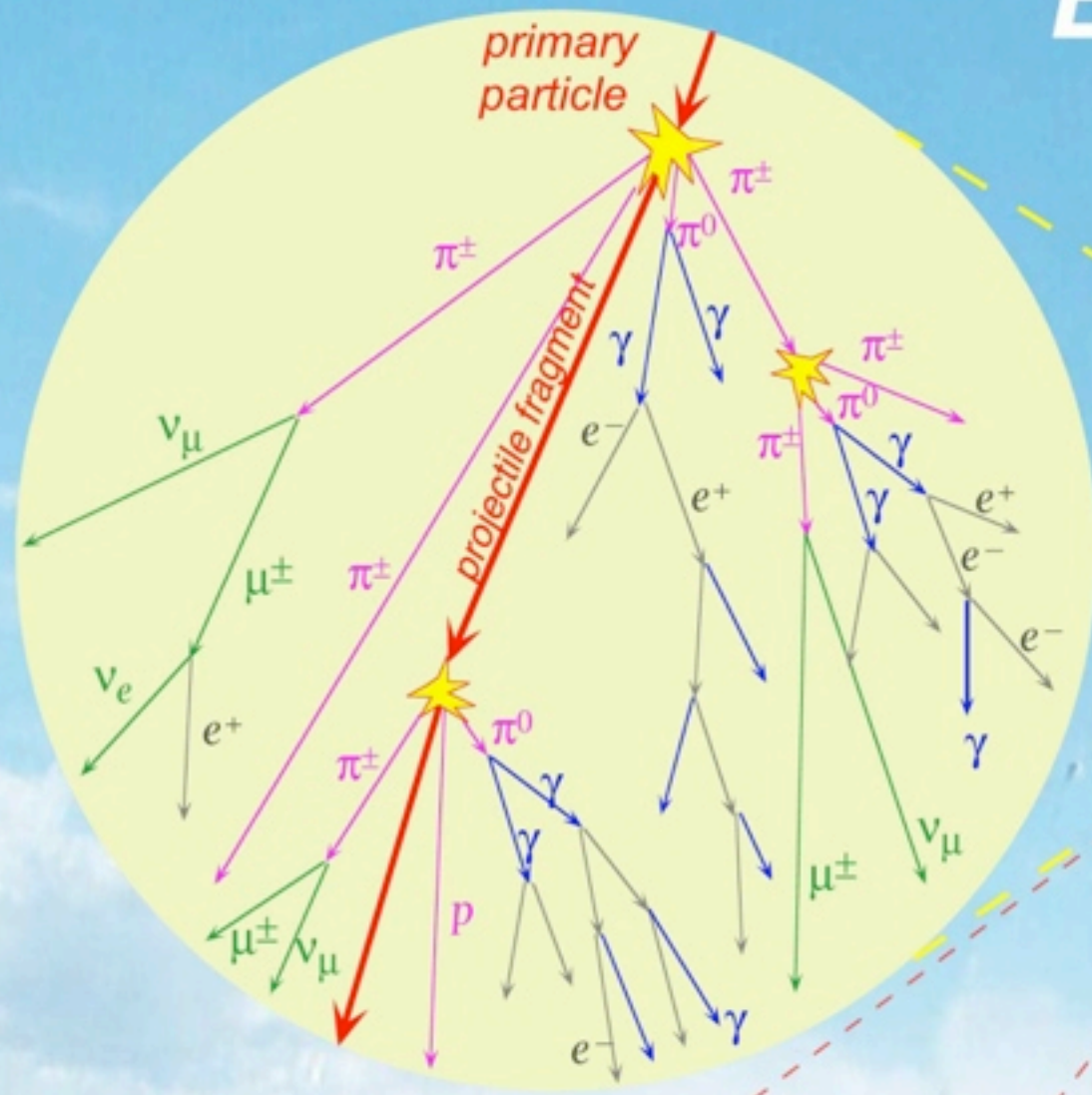
§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit.

Es liege ein Koordinatensystem vor, in welchem die Newtonschen mechanischen Gleichungen gelten. Wir nennen dies Koordinatensystem zur sprachlichen Unterscheidung von später einzuführenden Koordinatensystemen und zur Präzisierung der Vorstellung das „ruhende System“.

Ruht ein materieller Punkt relativ zu diesem Koordinatensystem, so kann seine Lage relativ zu letzterem durch starre Maßstäbe unter Benutzung der Methoden der euklidischen Geometrie bestimmt und in kartesischen Koordinaten ausgedrückt werden.

Wollen wir die *Bewegung* eines materiellen Punktes beschreiben, so geben wir die Werte seiner Koordinaten in Funktion der Zeit. Es ist nun wohl im Auge zu behalten, daß eine derartige mathematische Beschreibung erst dann einen physikalischen Sinn hat, wenn man sich vorher darüber klar geworden ist, was hier unter „Zeit“ verstanden wird.

Extended Air Showers



primary particle

Pierre Auger Observatory:
 $10^{19} \text{ eV} < E < 10^{21++} \text{ eV}$

- 1600 Water Cherenkov detectors
- 1.5 km spacing on 3000 km²
- 4 stations with 30 electronic telescopes

1 m thickness

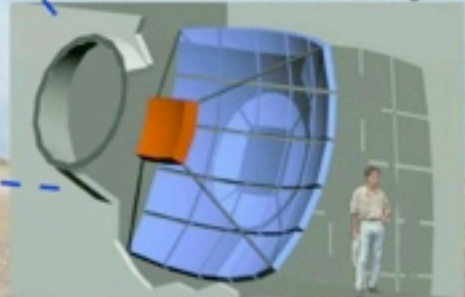
Trajektorie

$\gamma \approx c$

Cherenkov light

Fluorescence light - isotropic

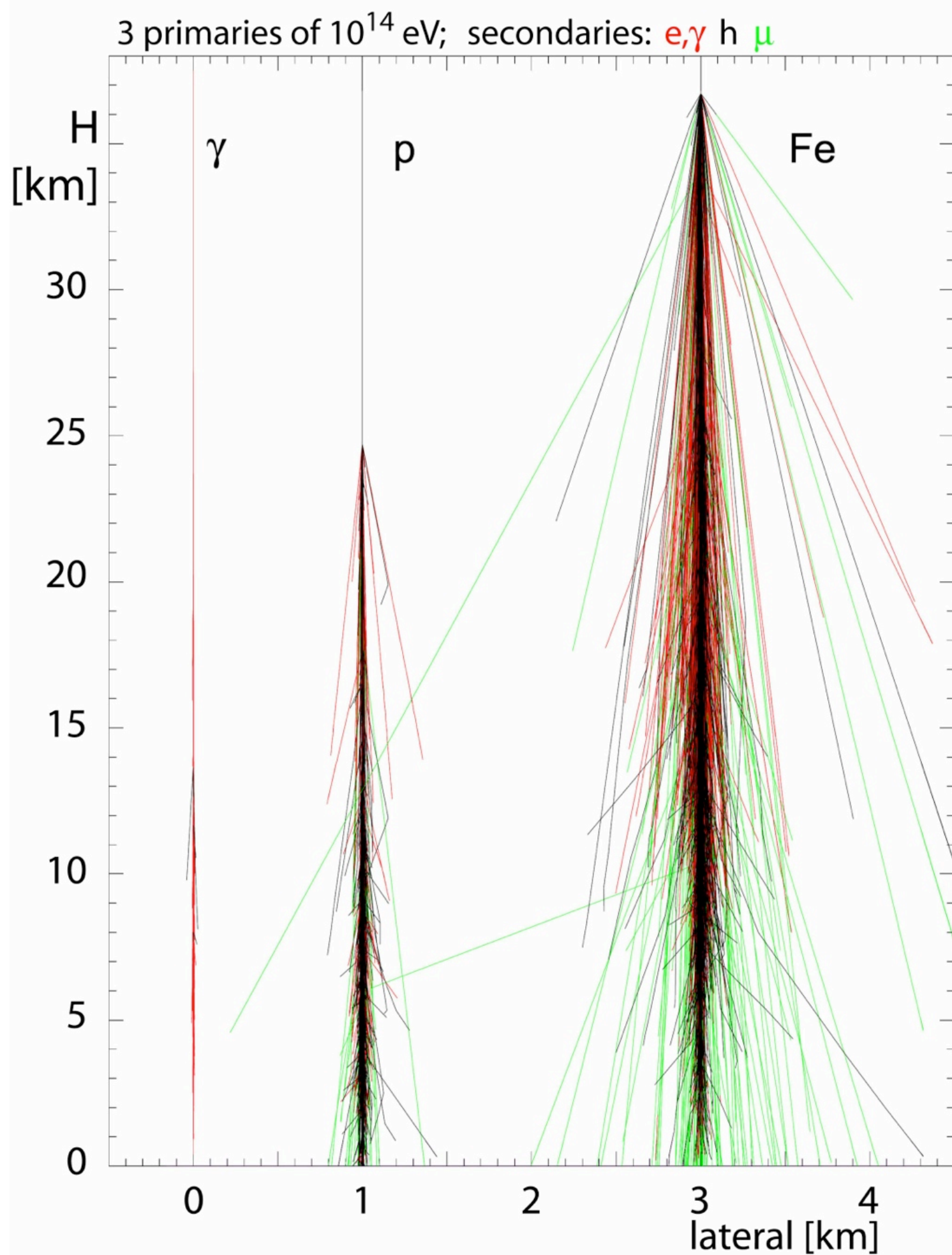
Electronic Schmidt telescope



...not to scale

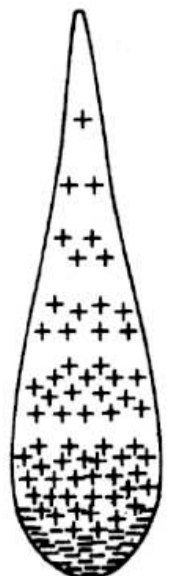
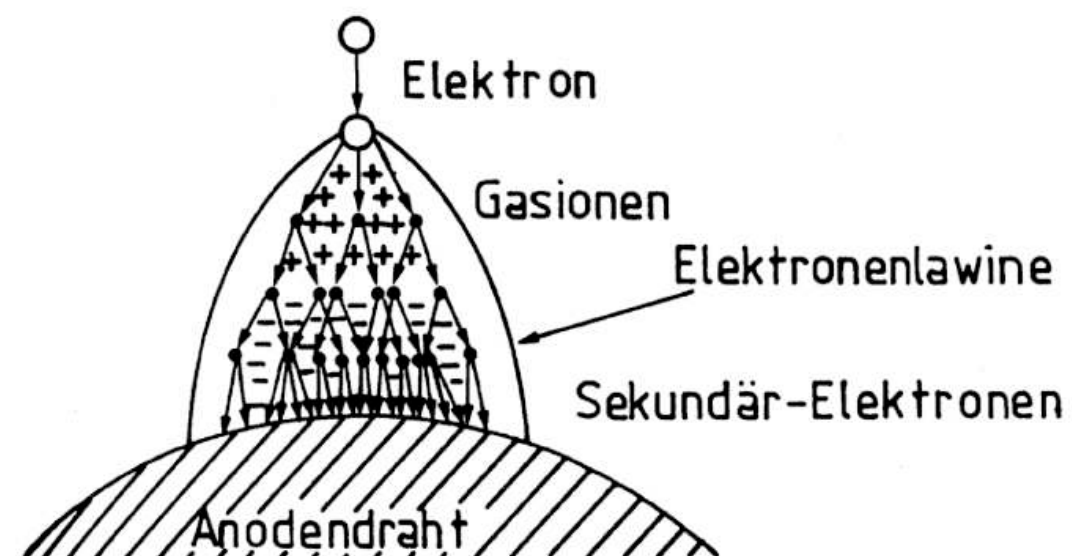
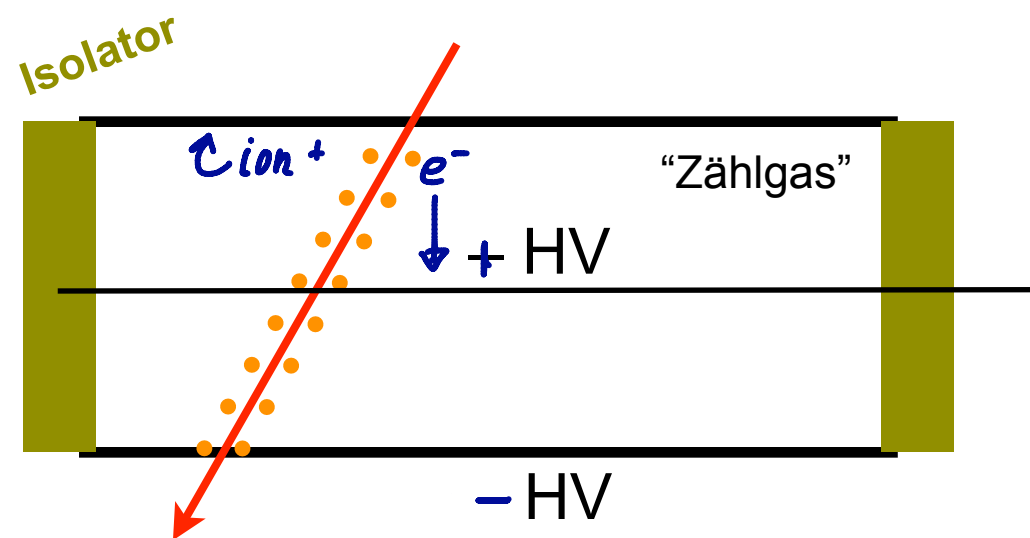
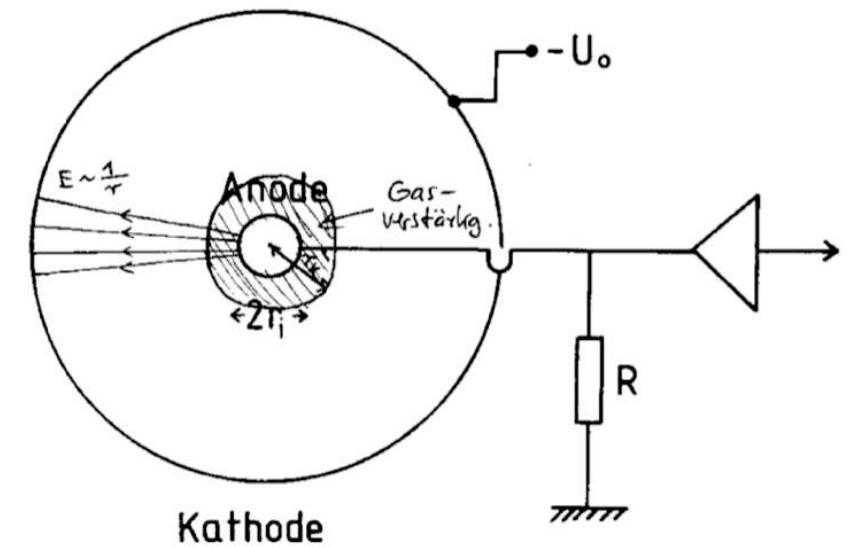
Water-Cherenkov detectors

1,5 km



detaillierte mikroskopische
Simulation des Verhaltens *aller*
Schauerteilchen mit Monte Carlo-
Methode

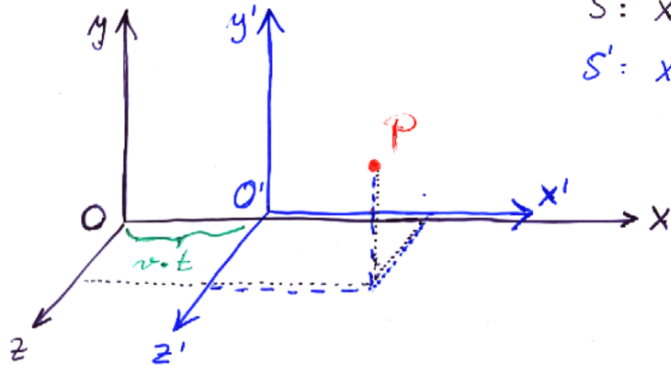
Geigerzähler



Einsteinsche Postulate

E1: ~~3~~ ausgezeichnet.
2erthalsyst.

E2: $c = \text{const.}$



$S: x, y, z$ -System

$S': x', y', z'$ -System

S' bewegt sich mit Geschwindigkeit v
in x -Richtung (in S gemessen)

$t = t' = 0$: Ursprünge O und O' fallen
zusammen

(Masseu-?) Punkt P in $S: x, y, z, t$

- " - in $S': x', y', z', t'$

Galilei-Transf.

$$x = x' + vt \quad y = y' \quad z = z' \quad t = t'$$

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t$$

klassische Vereinfachung
"ok für $v \ll c$ "

Lorentz-Transformation

Ansatz $x = x' + vt'$
im System S

$$\rightarrow x = \gamma (x' + vt')$$

↑
gesucht

γ kann nicht von $x, y, z, t, x', y', z', t'$ abhängen
w. E!

$$\gamma = \gamma(v, c)$$

gleiche Betrachtung in S' : $x' = \gamma(x - vt)$

Beh. Lichtsignal, das in S bei $x=0, t=0$ startet

Synchron. $t = t' = 0$ wenn $\sigma = \sigma'$

Lichtwege $x = ct$ in S und $x' = ct'$ im Ansatz!
einsetzen.

 E2

$$\left\{ \begin{array}{l} x = ct = \gamma (x' + vt') = \gamma (ct' + vt') = \gamma t' (c+v) \\ x' = ct' = \gamma (x - vt) = \gamma (ct - vt) = \gamma t (c-v) \end{array} \right.$$

t elim., $t = t' \frac{c}{c-v} (c+v)$

$$\underset{=}{ct'} = \underset{=}{\gamma t' \frac{c}{c-v} (c+v)}$$

$$1 = \frac{\gamma^2}{c^2} (c+v)(c-v) = \gamma^2 \frac{c^2 - v^2}{c^2} = \gamma^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

also γ bestimmt:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta = v/c$$

Transformation für t :

$x = \gamma (x' + vt')$ in $x' = \gamma (x - vt)$ einsetzen, γ expliz. nach t auflösen $\Rightarrow t = \gamma \left(t' + \frac{x'v}{c^2} \right)$

insgesamt: L.T.

$$x = \gamma(x' + vt'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right)$$

$$x' = \gamma(x - vt), \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

kann dies in Matrixform schreiben ...

klarnisch: $\beta \ll 1$, daher $\gamma \approx 1$

beta, gamma

beta	beta	gamma	Beispiel
0.000001	1.00E-06	1.000000000000005	Flugzeug, 1080 km/h
0.0001	1.00E-04	1.0000000050000	Erdumlauf um die Sonne, 30 km/s
0.001	1.00E-03	1.0000005000004	Sonnenumlauf um Milchstrasse, 270 km/s
0.01	1.00E-02	1.0000500037503	
0.1	1.00E-01	1.00503782	
0.2		1.02062073	
0.3		1.04828484	Elektronen in Fernsehröhre, 30 keV
0.4		1.09108945	
0.5		1.15470054	
0.6		1.25	
0.7		1.40	
0.8	1 - beta	1.67	
0.9	1.00E-01	2.29	
0.99	1.00E-02	7.09	Sekundäre Myonen der Höhenstrahlung
0.999	1.00E-03	22.4	
0.9999	1.00E-04	70.7	
0.999999	1.00E-06	707	
0.9999999	1.00E-07	2 236	
0.99999999	1.00E-08	7 071	Protonen im LHC bei 7 TeV
0.999999999	1.00E-09	22 361	
	5.00E-23	1E+11	extragalaktisches Proton 10 ²⁰ eV



Zeitdehnung

S' bewege sich mit v in x -Richtung gegen S

$\Delta t'$ zwischen Ereignissen, die in S' am gleichen Ort x'_0 sind, $\Delta t' = t'_2 - t'_1$

Länge des Zeitintervalls zwischen den gleichen Ereignissen in S ?

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

falsch: $\Delta t' = \Delta t$

L.T. anwenden $t_1 = \gamma \left(t'_1 + \frac{v x'_0}{c^2} \right)$

$$t_2 = \gamma \left(t'_2 + \frac{v x'_0}{c^2} \right)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma (t'_2 - t'_1) = \gamma \Delta t'$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

Beispiel " μ ":

im Erdsystem

$$\tau \approx 2 \mu s$$

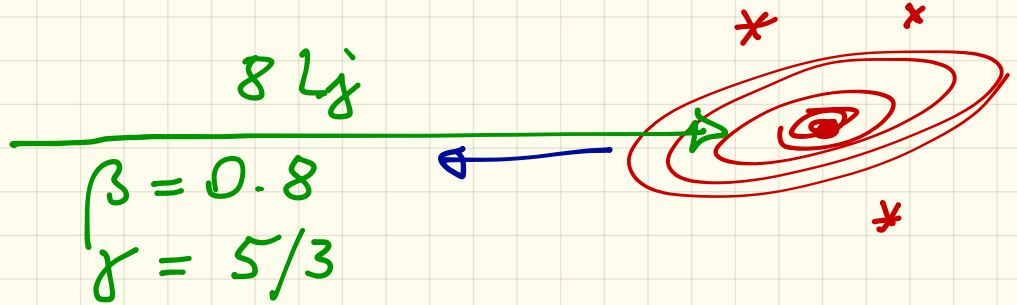
"Eigenzeit" im bewegten System

$$\Delta t_E, \Delta \tau$$

"Zwillingsparadoxon"

A 

B 



A: +20 Jahre B: +12 Jahre = $\frac{20 \text{ j.}}{\gamma}$

Rollentausch von A, B ist nicht möglich

└ nicht (immer) in einem Inertialsystem

B: $\frac{16 \text{ Lj.}}{12 \text{ j.}} ? > c ? \Rightarrow \underline{\text{Längenkontraktion!}}$

Längenkontraktion

muss auch Längen (Differenzen von Koord.!)
Lorentz-transformieren

„Ruhelänge“: Länge eines Objektes o.ä.
in seinem Ruhesystem
= Koordinatendifferenz

S' : Stab der Länge $l_R = l' = x_2' - x_1'$

S' bewege sich von S aus gesehen mit v in
 x -Richtung
Stablänge in S ?

$l = x_2 - x_1$ gemessen $t_2 = t_1 = t$

$$\left. \begin{array}{l} x_2' = \gamma(x_2 - v \underline{t_2}) \\ x_1' = \gamma(x_1 - v \underline{t_1}) \end{array} \right\} l_R = x_2' - x_1' = \gamma(x_2 - x_1)$$

bzw. $\boxed{l = l_R / \gamma} = \gamma l$