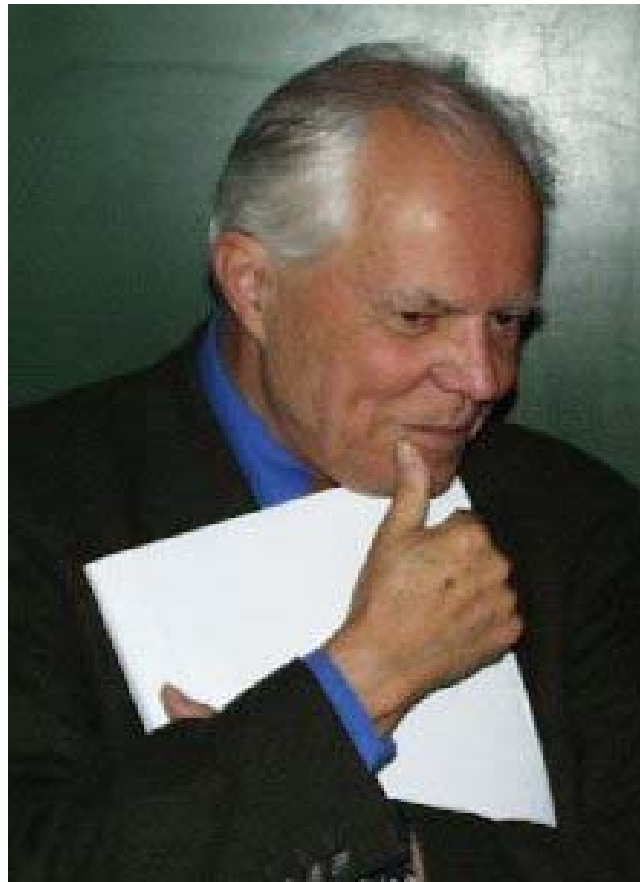


10. Mößbauer, Rebka, Pound, Snyder und rotverschobene Photonen

Im Jahr 1958 entdeckte **Rudolf Mößbauer**, ein Münchener Doktorand von Heinz Maier-Leibnitz, am Heidelberger Max-Planck-Institut für Medizin 'zufällig' einen **Effekt**, der später seinen Namen tragen sollte, und der ungeahnte Perspektiven für bisher **'unmögliche' Präzisionsmessungen** in den verschiedensten Gebieten der Physik, Medizin und Technik eröffnete. Da Mößbauer 'seinen' Effekt zwar zufällig entdeckt hatte, ihn nach bravouröser Gedankenarbeit aber 'richtig' erklären konnte, erhielt er dafür schon im Jahr 1961 den Nobelpreis für Physik.



Rudolf L. Mößbauer, TU München, Nobelpreis 1961

Mößbauers Doktorarbeit kreiste um das -milde ausgedrückt- etwas unanschauliche Thema: **'Resonanzfluoreszenz von Atomkernen'**. Um hier zu brauchbaren Daten zu kommen, befestigte Mößbauer radioaktive **Quellen von γ -Strahlung** auf schnell rotierenden, **schallplattenähnlichen Vorrichtungen**. Welchen Hintergrund und Sinn hatte diese selbst für Physiker etwas ungewöhnliche Vorgehensweise?

Wenn ein angeregter Atomkern mit der Energie $E_2 = m_2 c^2$ ein γ -Quant zum Zustand $E_1 = m_1 c^2$ emittiert, erhält der Kern eine **Rückstoßenergie E_R** , die dem γ -Quant **fehlt**:

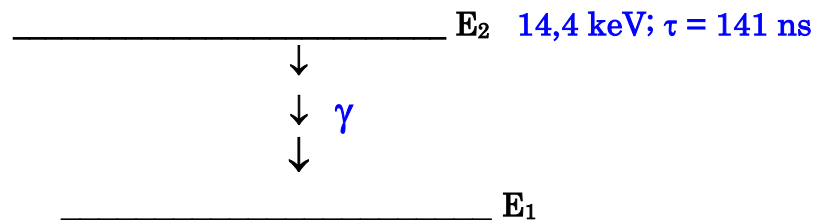
$$\begin{array}{c}
 \text{----- } E_2 \\
 \downarrow \\
 \downarrow \gamma \quad \Delta E = E_2 - E_1 \\
 \downarrow \\
 \text{----- } E_1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 E_R = p_\gamma^2 c^2 / 2 m_1 c^2 \\
 E_\gamma = p_\gamma c = \Delta E - E_R
 \end{array}
 \qquad (10.1)$$

Das γ -Quant kann daher im gleichen Material **nicht resonant absorbiert** werden, da ihm die Rückstoßenergie E_R **'fehlt'**. Zur resonanten Absorption müsste E_R **zusätzlich zu ΔE** aufgebracht werden, da auch hier die Rückstoßenergie des absorbierenden Kerns vom γ -Quant 'beigesteuert' werden muss. Es **fehlt** daher zur Resonanzabsorption **eine Energie von**:

$$2E_R = p_\gamma^2 c^2 / (m_1 c^2) = E_\gamma^2 / (m_1 c^2) = \{ \Delta E - E_R \}^2 / (m_1 c^2) \quad (10.2)$$

Beispiel: $E_2 = 14,44 \text{ keV}$ in ^{57}Fe ; mittlere Lebensdauer $\tau = 1,4 \times 10^{-7} \text{ s}$

$$E_R \approx 14,44^2 \times 10^6 \text{ (eV)}^2 / (57 \times 931,5 \times 10^6 \text{ eV}) = 3,9 \times 10^{-3} \text{ eV}$$



'Natürliche Linienbreite' $\Gamma \approx \hbar / \tau = 4,8 \times 10^{-9} \text{ eV}$

$$\rightarrow \qquad 2E_R / \Gamma = 1,6 \times 10^6 \qquad (10.3)$$

die zur Resonanzabsorption **fehlende Energie** von $2E_R \approx 8 \times 10^{-3} \text{ eV}$ ist etwa **6 Größenordnungen größer** als die **'natürliche Linienbreite Γ '**

Wie könnte man die etwa **8 meV 'Verstimmung'** im Fall des ^{57}Fe kompensieren? Die naheliegende Idee war, eine positive **Dopplerverschiebung von $\Delta E_D = 8 \text{ meV}$** durch **schnelle Bewegung von Quelle oder Absorber** zu erzeugen. Das ist die Grundidee der 'erzwungenen' Kern-Resonanzfluoreszenz. Da die Dopplerverschiebung in linearer Näherung

$$\Delta E_D \approx v/c E_\gamma = \beta E_\gamma$$

ist, bräuchte man für $\Delta E_D = 8 \text{ meV}$ und $E_\gamma = 1,4 \times 10^4 \text{ eV}$

$$\beta = (8 \times 10^{-3}) / (1,4 \times 10^4) = 5,7 \times 10^{-7} \rightarrow v = 171 \text{ m/s} = 616 \text{ km/s} \quad (10.4)$$

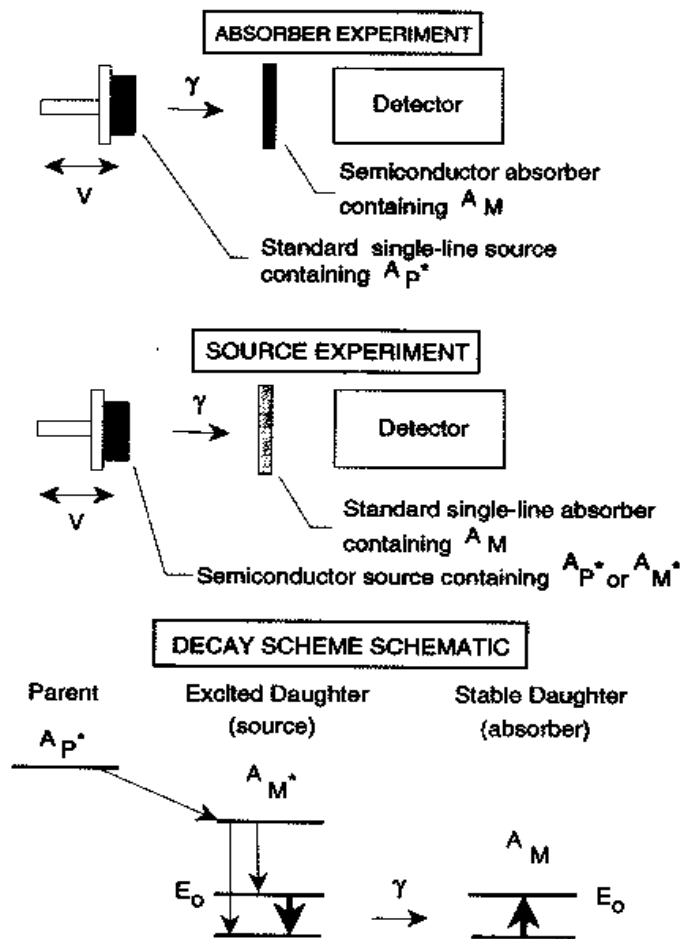


Fig. 1. Semiconductor absorber vs source Mössbauer experiments and schematic radioactive source decay scheme. Note. Since only the *relative* velocity between the source and the absorber is required, either the source or the absorber may be given a velocity v .

Experiment zur Kern-Resonanzfluoreszenz durch Bewegung von
Quelle oder Absorber

Resonanzfluoreszenz -zumindest partiell- zu erzwingen war die Motivation, γ -Quellen an den Rand von Zentrifugen zu setzen (z.B. erreicht man am Rand einer Scheibe von $r = 30$ cm Radius bei 100 Umdrehungen/s eine Geschwindigkeit $v = 2\pi r \times 100 = 188$ m/s, also bereits die richtige Größenordnung). Ein weiteres Mittel, sich der Resonanzenergie zu nähern, war die 'künstliche' Verbreiterung der natürlichen Linienbreite durch thermische Bewegung, also z.B. durch Aufheizen der Quelle.

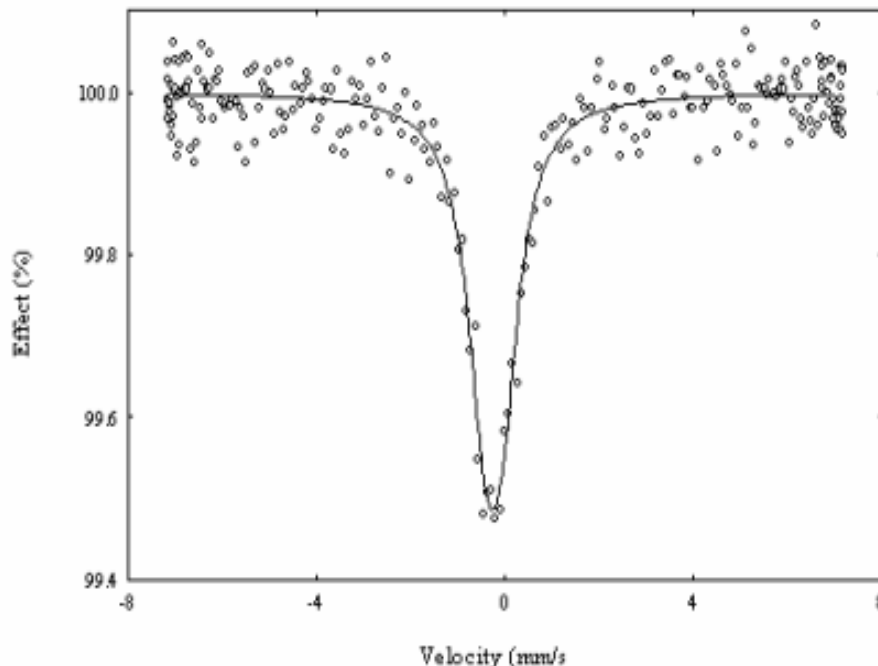
Mößbauer arbeitete in Heidelberg mit einer **$^{191}\text{Iridium-Quelle}$** ($E_\gamma = 129$ keV, Rückstoßenergie $E_R = 94 \times 10^{-3}$ eV, natürliche Linienbreite $\Gamma = 1,2 \times 10^{-7}$ eV); hier ist das Verhältnis E_R/Γ 'nur' 8×10^5 . Um $2E_R \approx 0,2$ eV durch Dopplerverschiebung zu kompensieren, bräuchte man hier also ein β bzw. eine Geschwindigkeit v :

$$2E_R \approx \beta E_\gamma \quad \rightarrow \quad \beta = 1,5 \times 10^{-6} \quad \rightarrow \quad v = 450 \text{ m/s} = 1620 \text{ km/s}$$

Mößbauer tat nun etwas wirklich Verrücktes: er kühlte seine Iridiumquelle auf **tiefe Temperaturen** ab und:

beobachtete **Resonanzabsorption** nicht bei der erwarteten Überschallgeschwindigkeit, sondern **bei Geschwindigkeiten von einigen cm/s!!**

Als man ein analoges Experiment später mit **^{57}Fe bei Normaltemperatur** durchführte, erhielt man eine **Absorptionslinie** mit einer **'Geschwindigkeitsbreite'** der Quelle **von Bruchteilen von mm/s**.

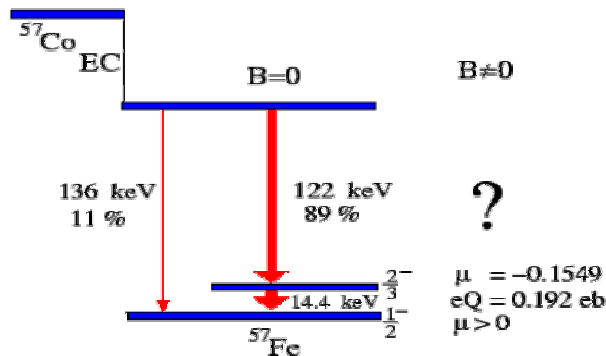
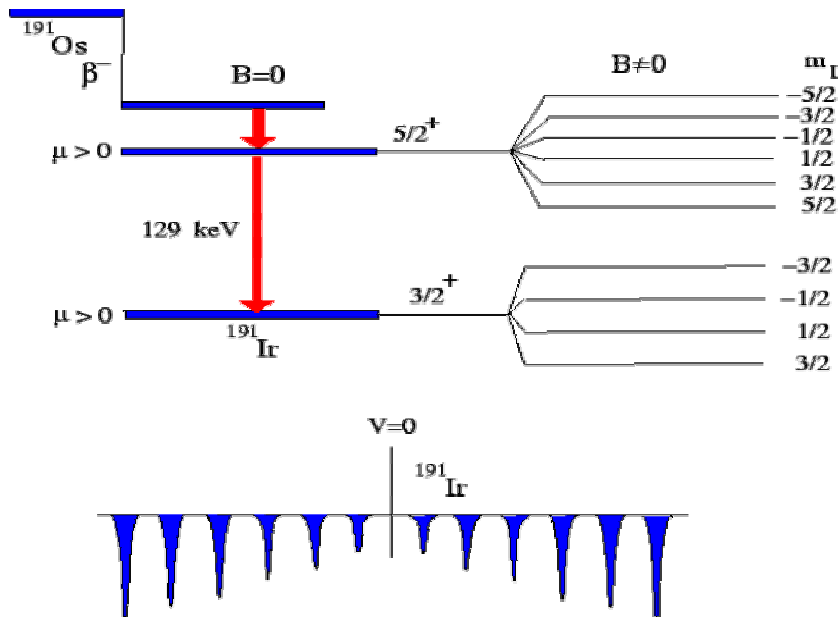


Resonanzabsorption der **14,4 keV**-Linie einer **^{57}Fe** -Quelle

Offenbar hatten die γ -Quanten in beiden Fällen so gut wie **keine Rückstoßenergie E_R verloren**. Wie war das möglich? Betrachtet man den Ausdruck für E_R

$$E_R = E_\gamma / (2mc^2)$$

sieht man, dass E_R beliebig klein werden kann, wenn die Rückstoßenergie **nicht auf einen einzigen Atomkern** (Masse m), sondern **auf eine viel größere Masse M** 'aufgeteilt' werden könnte. Hat man z.B. statt eines **ca. 10^6 Atomkerne**, gelangt für unsere Fälle E_R in die Größenordnung von Γ !



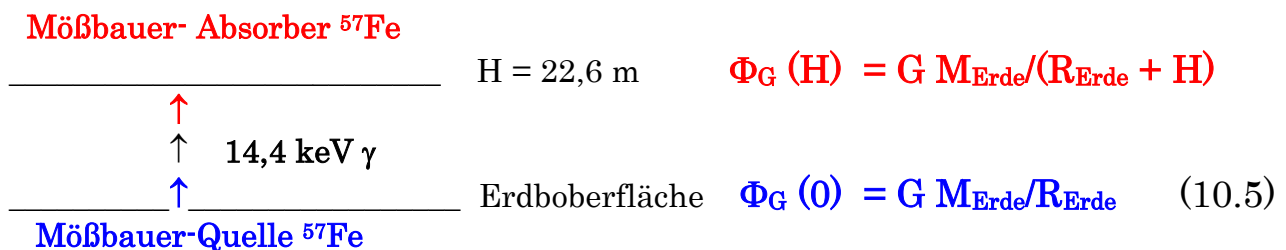
Resonanzabsorption von ^{191}Ir im Magnetfeld (Quelle und Absorber), die direkt die **Zeeman-Aufspaltung** zeigt, bzw. von ^{57}Fe (unten)

Die Erklärung für eine mögliche (fast) rückstoßfreie Emission fand Mößbauer schließlich in der Festkörperphysik: ein γ Quant kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit **ohne Anregung eines Phonons** (Gitterschwingung des Festkörpers) **emittiert werden**. In einem solchen Fall übernimmt nicht der emittierende Atomkern, sondern **das ganze Gitter die Rückstoßenergie** (statt 'm' muss man dann in der Formel für E_R 'n x m' setzen, wobei **n die Zahl der Atome des** (Mikro)- **Kristalls** bedeutet, d.h. $n = 10^{16} \dots 10^{20}$. Damit aber verkleinert sich E_R um eben diesen Faktor $10^{16} \dots 10^{20}$.

Die **Wahrscheinlichkeit für diese 'rückstoßfreie'** oder 'phononenfreie' **Emission** nennt man '**Debye-Waller-Faktor (DWF)**'. Er hängt von der Bandstruktur der Phononen des jeweiligen Kristalls und ist demzufolge eine **Funktion der Temperatur T und der Gammaenergie**. Je kleiner T und E_γ sind, desto größer ist normalerweise der DWF. Für ein **Eisengitter** ist der DWF **bei Zimmertemperatur und $E_\gamma = 14$ keV groß** (40 - 50%), bei Iridium und $E_\gamma = 129$ keV dagegen ist er erst bei tiefen Temperaturen ($T = 80$ K) erheblich. Die rückstoßfreie Emission von γ Quanten erlaubt es also, eine **Gammalinie innerhalb ihrer natürlichen Linienbreite** zu untersuchen. Damit erhielten die Physiker ein 'Präzisionsgerät' ungeahnter Güte mit Anwendungen in allen Gebieten der Physik, sowie in Technik und Medizin.

10.2 Photonen werden 'rot': das Mößbauer- Experiment von Rebka, Pound und Snyder

Eine der ersten und zugleich spektakulärsten Anwendungen des Mößbauereffekts in der Physik war das **Experiment von Rebka, Pound und Snyder (1960/61)**, mit dem zum ersten Mal nachgewiesen wurde, dass die **Energie von Photonen** -gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie- **vom Gravitationspotential abhängt**, oder anders gesagt, dass **der Gang von Uhren in unterschiedlichen Gravitationsfeldern unterschiedlich ist**. Dann führt z.B. das unterschiedliche Gravitationspotential auf der **Erdoberfläche** bzw. **in einer Höhe H** über dem Erdboden zu einer **Frequenzverschiebung $\Delta\nu$** (**Frequenz = Schwingungszahl pro Zeit**) eines nach 'oben' laufenden Photons, die aber extrem klein ist. In der ultrapräzisen **Empfindlichkeit des Mößbauereffekts** sahen **Rebka, Pound und Snyder** die zur damaligen Zeit (und heute) einzige Chance, diesen winzigen Effekt nachzuweisen und damit -gegebenenfalls- die **Allgemeine Relativitätstheorie zu bestätigen**.



Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ergibt sich für die **Frequenz ν'** eines Photons, das sich **im Gravitationspotential Φ_G** eines Körpers mit der Masse M und dem Radius R in einer Höhe H über der Oberfläche befindet (Abstand vom Massenzentrum $=R + H$) näherungsweise:

$$\nu'(R + H) = \nu_0(R) \left\{ 1 - (\Phi_G(R) - \Phi_G(R + H))/c^2 \right\} \quad (10.6)$$

Mit den Gravitationspotentialen $\Phi_G(0)$ bzw. $\Phi_G(H)$ aus (10.5) und $M_{\text{Erde}} = M$, $R_{\text{Erde}} = R$ ergibt sich daraus:

$$\nu'(R + H) = \nu_0(R) \left\{ 1 - 1/c^2 [GM/R - GM/(R + H)] \right\}$$

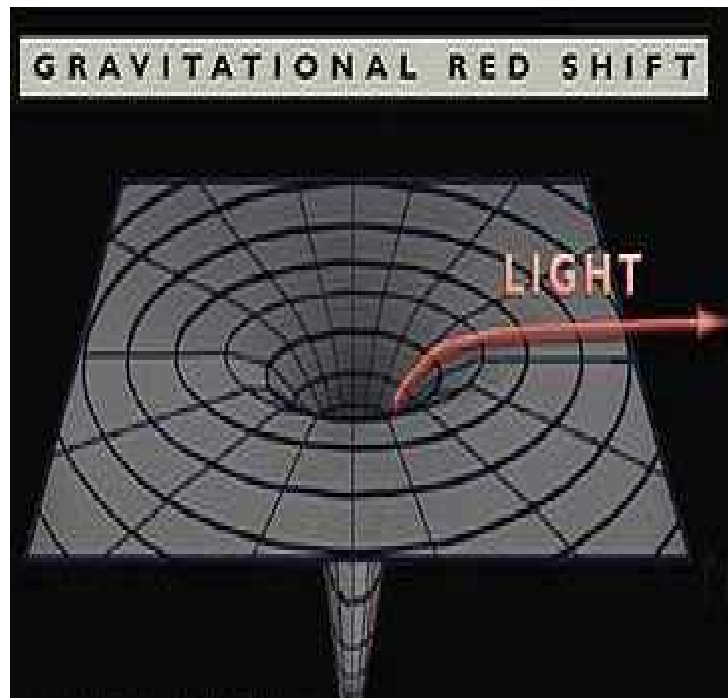
$$\text{für } (h \ll R) \rightarrow \nu' = \nu_0 \left\{ 1 - GMH/(c^2 R^2) \right\} \quad (10.7)$$

Mit $GM/R^2 = g = 10 \text{ m/s}^2$ folgt dann für die **Frequenzverschiebung $\Delta\nu = \nu_0 - \nu'$** :

$$\Delta\nu = g H/c^2 \nu_0$$

bzw. für die **Energieverschiebung ΔE** :

$$\Delta E = E_0 - E' = h \Delta\nu = E_0 g H/c^2 \quad (10.8)$$



Mit $g = 10 \text{ [m/s}^2\text{]}$, $H = 22,6 \text{ [m]}$, $E_0 = 1,44 \times 10^4 \text{ [eV]}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$

$$\rightarrow \Delta E = 3,6 \times 10^{-11} \text{ [eV];}$$

$$\rightarrow \Delta E/E_0 = 3,6 \times 10^{-11} / (1,44 \times 10^4) = 2,5 \times 10^{-15}$$

bzw. relativ zur natürlichen Linienbreite Γ :

$$\Delta E/\Gamma = 3,6 \times 10^{-11} / (4,8 \times 10^{-9}) \approx 0,0075 \quad (10.9)$$

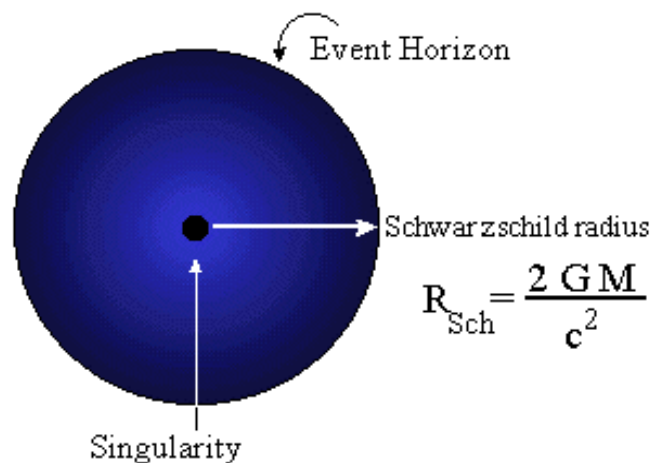
In 22,6 m Höhe sollte sich also die Energie der 14,4 keV Linie des ^{57}Fe um etwa 1/100 der natürlichen Linienbreite ins 'Rote' verschoben haben. Wenn überhaupt, könnte man eine derartig winzige Verschiebung nur mit Hilfe des Mößbauereffekts nachweisen.

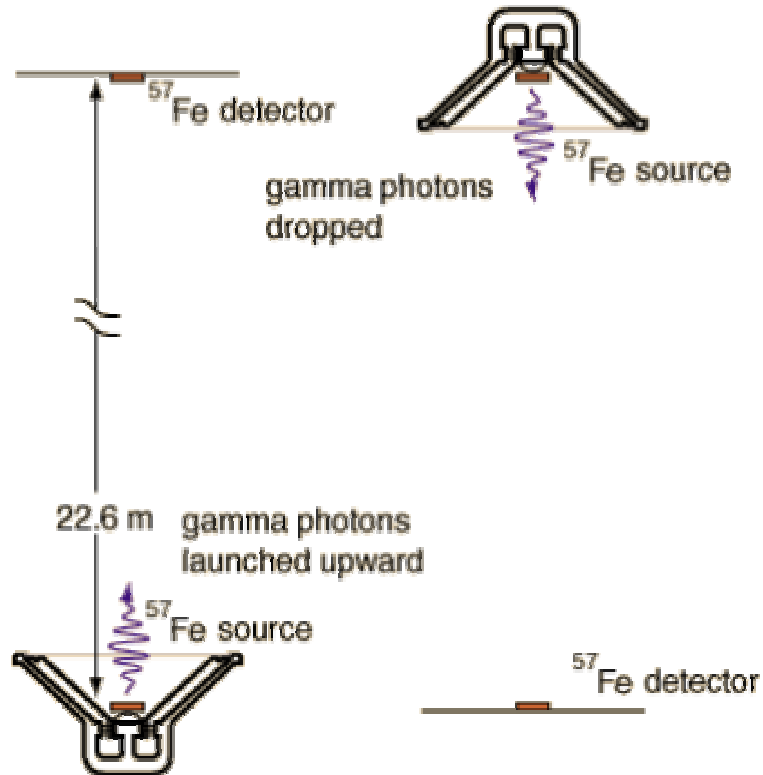
Lässt man die Höhe $H \rightarrow \infty$ gehen, erhält man in der exakten Theorie:

$$v' = v_0 \{ 1 - 2GM/(Rc^2) \}^{1/2}; \rightarrow v' = 0 \text{ für } 2GM/(Rc^2) \approx 1, \text{ d.h.}$$

$$R \equiv R_S = 2GM/c^2 \quad (10.10)$$

R_S ist der 'Schwarzschildradius', bei dem ein Photon nicht mehr aus dem Gravitationspotential entweichen kann (ein 'Schwarzes Loch'). Für die Sonne z.B. mit $M_\odot = 2 \times 10^{33} \text{ g}$, $G = 6,7 \times 10^{-8} \text{ [cm}^3\text{/(gs}^2\text{)]}$ ist $R_S = 3 \text{ km}$; für die Erde mit $M_E = 6 \times 10^{27} \text{ g}$ ist $R_S = 0,9 \text{ cm}$.]





Das Experiment von Rebka, Pound und Snyder wurde 1960 im 'Harvard Tower' durchgeführt mit einem vertikalen Abstand von **22,6 m** zwischen einer 10 mCi ($3,7 \times 10^8$ Bq) starken ^{57}Fe -Quelle und einem wenige cm^2 großen ^{57}Fe -Absorber. In Quelle und Absorber war ^{57}Co (die 'Mutter' von ^{57}Fe) per Diffusion in eine mittlere Tiefe von wenigen 100 nm gebracht worden. Danach wurden die Oberflächen sorgfältig ausgeheizt. Man registrierte **pro Sekunde etwa 6 $14,4 \text{ keV } \gamma$ -Quanten**; davon waren mit Berücksichtigung des DWF **etwa 2-3 'rückstoßfreie'**. Von diesen wurden aber, selbst im Maximum der Resonanzabsorption, nur einige wenige absorbiert.

Die **Quelle war auf einem Lautsprecher** montiert, der **mit 10 Hz** betrieben wurde. Dadurch erhielt man eine **periodische, sinusförmige Geschwindigkeitsverteilung**. Jedem registrierten γ -Quant N_i wurde dann die jeweilige Geschwindigkeit v_i zugeordnet. Man erwartete das **Minimum der Transmission nicht bei $v = 0$** , sondern, gemäß

$$\Delta E = 3,6 \times 10^{-11} \text{ eV} = \beta E_0 = \beta \times 1,44 \times 10^4 \text{ eV}$$

$$\text{bei } \beta = 2,5 \times 10^{-15}, \text{ d.h. } v_{\text{Min}} = + 7,5 \times 10^{-4} \text{ mm/s} \quad (10.11)$$

Nach einer viele Tage dauernden Messzeit (man brauchte ja exzellente Statistik für sehr viele Geschwindigkeiten!) vertauschte man Quelle und Absorber; jetzt musste das Minimum der Transmission bei **$v_{\text{Min}} = - 7,5 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$** erscheinen (Quelle bewegt sich **vom Absorber weg**, da **die nach 'unten' laufenden Photonen jetzt blauverschoben** sind!).

Als Ergebnis einer langen Messzeit erhielten Rebka, Pound und Snyder aber **keinen** Effekt! Waren die 'roten Photonen' der Allgemeinen Relativitätstheorie also nur Phantome?? Man brauchte sehr lange und die Hilfe vieler Physiker, um herauszufinden, warum das Experiment gescheitert war; ein äußerst findiger, 21-jähriger (!!) Doktorand entdeckte des Pudels Kern: **winzige Temperaturunterschiede zwischen Quelle und Absorber** führen ebenfalls zu einer **Verschiebung der Resonanzabsorption** und zwar in einer zum Gravitationseffekt vergleichbaren Größenordnung!

Nachdem man dann Quelle und Absorber auf eine **exakt gleiche Temperatur** stabilisiert hatte, fand man die **erwartete Verschiebung** - und zwar **innerhalb von 2% der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie**:

$$\begin{aligned} & \{\Delta E/E_0\}_{\text{auf}} - \{\Delta E/E_0\}_{\text{ab}} \\ = & 5 \times 10^{-11} \quad (\text{Allg. Relativitätstheorie, Gl.10.9}) \\ = & (5.1 \pm 0.5) \times 10^{-11} \quad (\text{Experiment}) \end{aligned} \quad (10.12)$$

