1. Wie groß sind die Impulse folgender **Photonentypen**?

a) Infrarotphoton mit **λ = 12,4 µm** *(<u>Lösung</u>:* $5{,}35 \cdot 10^{-29}$ kgms^{-1}*)*

b) „rotes" Photon mit **λ = 620 nm** *(<u>Lösung</u>:* $1{,}07 \cdot 10^{-27}$ kgms^{-1}*)*

c) Gamma-Quant mit **$\lambda = 6{,}2 \cdot 10^{-4}$ nm** *(<u>Lösung</u>:* $1{,}07 \cdot 10^{-21}$ kgms^{-1}*)*

d) Welche Geschwindigkeiten hätten **Wasserstoffatome** (**m_H = 1,00794 u**) mit diesen Impulsen? *(<u>Lösung</u>: a)* $v_H = 0{,}032$ ms^{-1}, *b)* $v_H = 0{,}64$ ms^{-1}, *c)* $v_H = 6{,}41 \cdot 10^5$ ms^{-1}*)*

e) Können diese Geschwindigkeiten klassisch berechnet werden oder ist die relativistische Impulsbeziehung zu verwenden?

2. **Unmöglichkeit der Photonenabsorption durch freie Elektronen.**

➔ Man zeige, dass Energie- und Impulserhaltung nicht gleichzeitig gelten können, wenn ein **freies Elektron** mit der **Geschwindigkeit v_1** ein **Photon** der **Energie $E = h\nu$** vollständig absorbiert und sich danach mit der Geschwindigkeit $v_2 > v_1$ weiterbewegt. (Das würde bedeuten, dass die gesamte Strahlungsenergie des Photons in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt wird.)

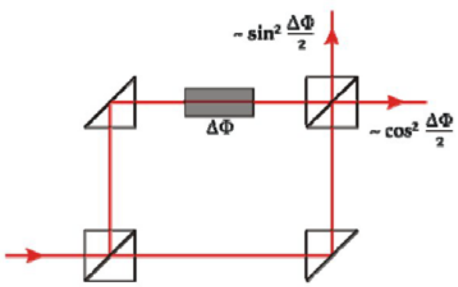
➔ Wieso bleiben Energie und Impuls beim Compton-Effekt erhalten?
(<u>Lösung</u>: $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 \Rightarrow$ *kein Energieübertrag möglich)*

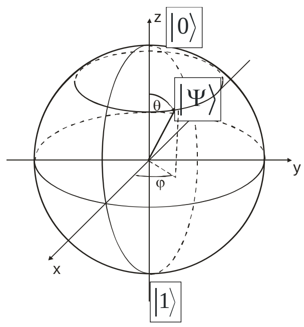
3. **Zweifach ionisierte Argon-Atome** bewegen sich mit der Energie **$E = 10^3$ eV** durch ein magnetisches 60°-Sektorfeld.

➔ Wie groß muß das Magnetfeld ***B*** sein, damit die Brennweite **f = 30 cm** beträgt? *(<u>Lösung</u>:* B = 55,41 mT)

<u>Hinweis</u>: e = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C, $u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg.

4. **Darstellung einer Interferometersequenz auf der Blochkugel:** Die in der Skizze dargestellte Interferometeranordnung soll graphisch mit Hilfe der Blochkugel dargestellt werden:





a) Das Teilchen befindet sich zu Beginn im Zustand $|0\rangle$. Der erste Strahlteiler erzeugt die folgende Superposition: $\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(|0\rangle + i \cdot |1\rangle\right)$. Dies entspricht einer Rotation um die x-Achse der Blochkugel. Im Interferometer erfährt der Zustand $|1\rangle$ einen Phasenschub $\Delta\Phi$. Man betrachte folgende 3 Phasenschübe: $\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$, $\Delta\Phi_2 = -\frac{3 \cdot \pi}{4}$ und $\Delta\Phi_3 = -\pi$. Der 2. Strahlteiler hat genau die gleiche Funktion wie der 1. Strahlteiler (eine Rotation um die x-Achse der Bloch-Kugel). Man Zeichne den Zustandsvektor und jede seiner Bewegungen auf der Blochkugel ein und gebe den Endzustand an.

b) Ein nachgeschalteter Detektor misst den Endzustand in der Basis $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Man gebe für alle 3 Phasenschübe die Wahrscheinlichkeiten P_0 und P_1, an dass am Ende der Zustand $|0\rangle$ bzw. $|1\rangle$ .gemessen wird. *(<u>Lösung</u>:*

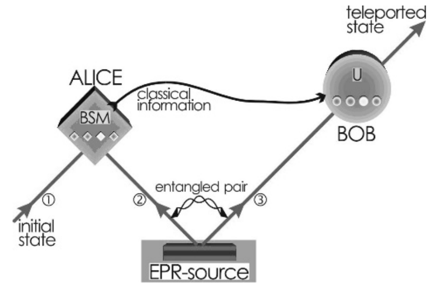
$\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$: *$P_0$ = 0,5, P_1 = 0,5;*

$\Delta\Phi_2 = -\frac{3 \cdot \pi}{4}$: *$P_0$ = 85,3%, P_1 = 14,7%;*

$\Delta\Phi_3 = -\pi$: *P_0 = 1, P_1 = 0)*

<u>Bitte Seite wenden!</u>

5. **Zwei Zweizustands-Systeme – Quantenteleportation:** Alice hat einen **unbekannten** Quantenzustand $|\phi\rangle_1 = \alpha\,|0\rangle_1 + \beta\,|1\rangle_1$, den sie Bob schicken möchte, aber keinen **direkten** Quanten-Link zu Bob.



a) warum kann Alice den Zustand nicht über einen klassischen Kommunikationskanal schicken?

Alice und Bob besorgen sich als Quantenressource einen **verschränkten Zustand**. Teilchen *(2)* geht an Alice, Teilchen *(3)* an Bob.

$$|\Phi^+\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_2\,|0\rangle_3 + |1\rangle_2\,|1\rangle_3\right)$$

Alice misst nun die beiden Quantenzustände *(1)* und *(2)* in der Bell-Basis der beiden Zweizustands-systeme, und teilt Bob das Ergebnis ($|\Phi^+\rangle_{12}$ oder $|\Phi^-\rangle_{12}$ oder $|\Psi^+\rangle_{12}$ oder $|\Psi^-\rangle_{12}$) über einen klassischen Kommunikationskanal mit.

b) welche Operationen muss Bob an seinem Quantenzustand *(3)* ausführen, damit er den unbekannten Quantenzustand *(1)* herstellen kann?

c) was ist mit dem ursprünglichen Zustand *(1)* passiert?

<u>Hinweis:</u> Der Vorschlag zum obigen Beispiel befindet sich in: Ch. Bennet et al. PRL 70, 1895 (1993), das zugehörige Experiment wird in N. Bouwmeester et al. Nature 390, 575 (1997) beschrieben.

6. **Verschränkung:** Welche der fünf im Folgenden gegebenen Zustände ist verschränkt. Begründen Sie Ihre Antwort:

$$\Psi_a = \frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\left(|01\rangle + e^{-\frac{i\cdot\pi}{4}}|10\rangle\right)$$ ☐ ja ☐ nein

$$\Psi_b = \frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\left(|1\rangle - i|0\rangle\right)\cdot\frac{1}{\sqrt{2}}\cdot\left(|1\rangle + |0\rangle\right)$$ ☐ ja ☐ nein

$$\Psi_c = \left[\frac{1}{2}|11\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}|00\rangle\right]$$ ☐ ja ☐ nein

$$\Psi_d = \left[\frac{\sqrt{3}}{2}|00\rangle - \frac{1}{2}\cdot e^{i\cdot\frac{3\pi}{4}}|10\rangle\right]$$ ☐ ja ☐ nein

$$\Psi_e = \left[\frac{1}{2}|11\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle - \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}|00\rangle\right]$$ ☐ ja ☐ nein

<u>Hinweis:</u> Man informiere sich über die sogenannte Schmidt-Zerlegung