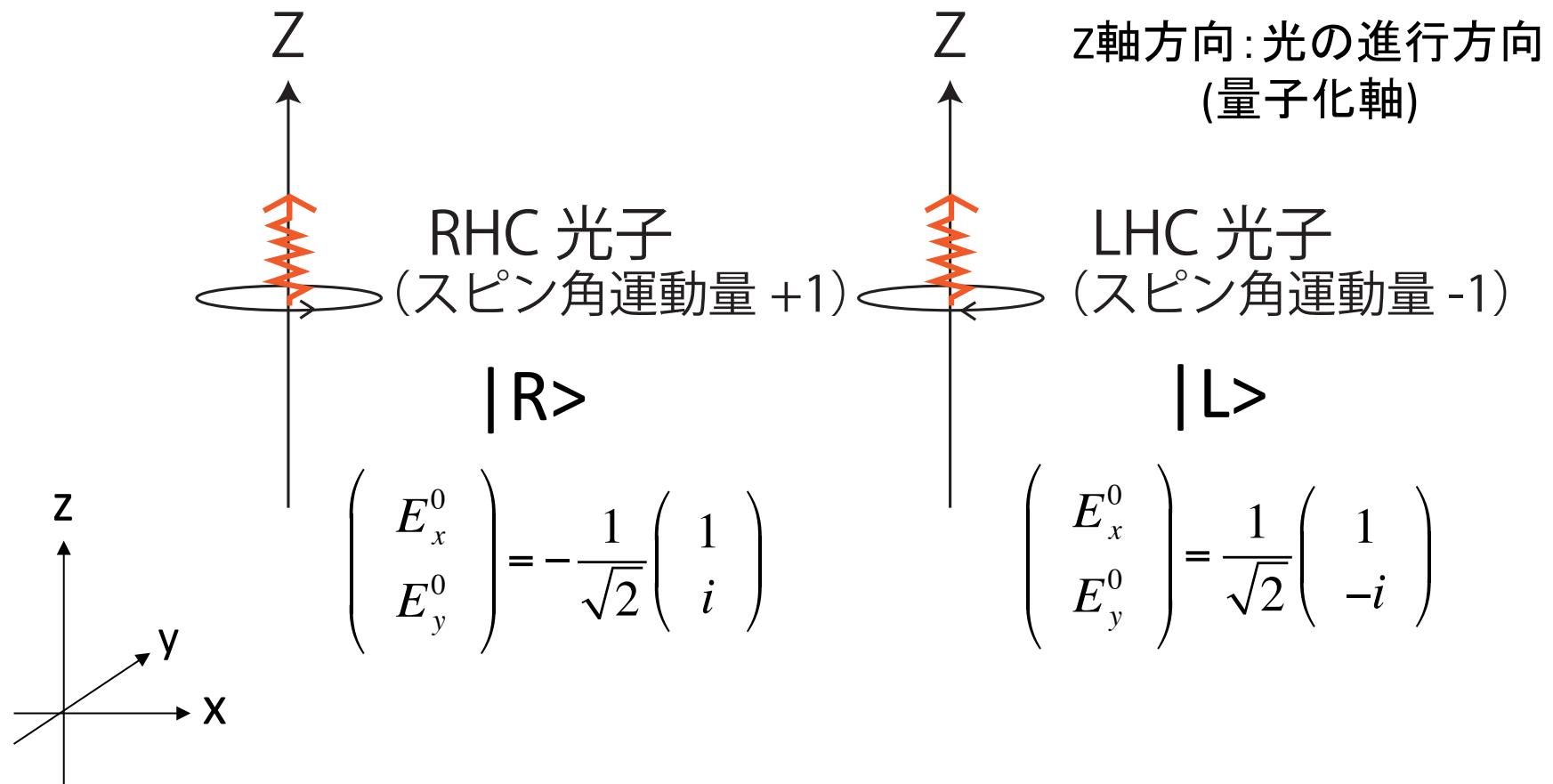


ハンレ効果の基礎 その2

2012.05.28

R. Ishikawa @ NAOJ

光子の放射



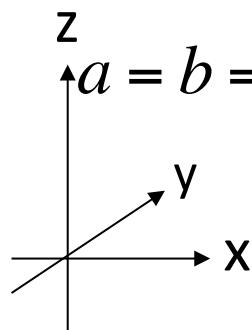
Coherentな足しあわせ

- ・ ジョーンズベクトルの足しあわせ

$$|E\rangle = a|R\rangle + b|L\rangle = -\frac{a}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{be^{i\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} : \text{橿円偏光}$$

$a = b = 1/\sqrt{2}, \varphi = 0^\circ$ のとき

$$|E\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|R\rangle + |L\rangle) = -i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} : y\text{方向直線偏光}$$



$a = b = 1/\sqrt{2}, \varphi = 180^\circ$ のとき

$$|E\rangle = a(|R\rangle - |L\rangle) = - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} : x\text{方向直線偏光}$$

$|R\rangle$ と $|L\rangle$ をcoherentに足し合わせると直線偏光に.

Incoherentな足し合わせ

- ・ストークスベクトルに変換して足し合わせ

$$|E\rangle = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} a - be^{i\varphi} \\ i(a + be^{i\varphi}) \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{ }} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 + b^2 \\ -2ab \cos \varphi \\ -2ab \sin \varphi \\ a^2 - b^2 \end{bmatrix}$$

$$|R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{ }} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1/2 \end{bmatrix}$$

$$|L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{ }} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ -1/2 \end{bmatrix}$$

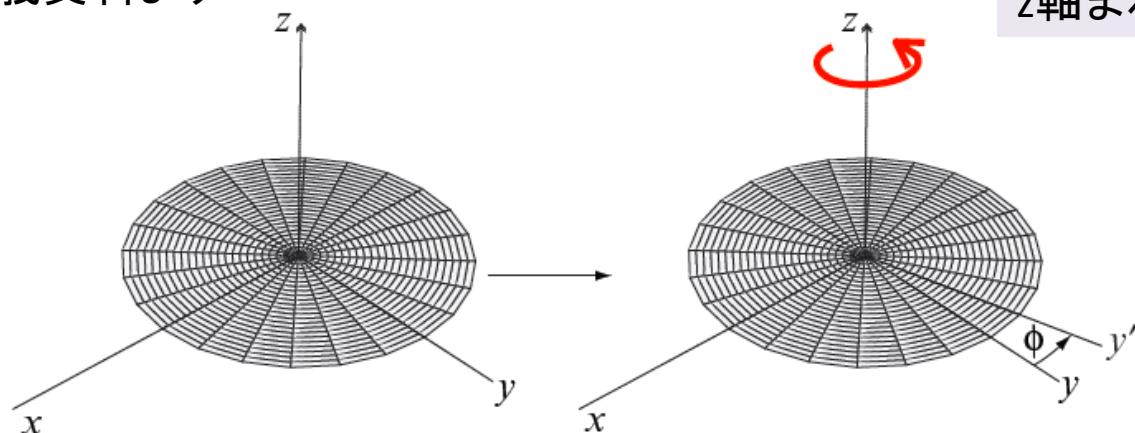


$|R\rangle$ と $|L\rangle$ をincoherentに足し合わせると無偏光.

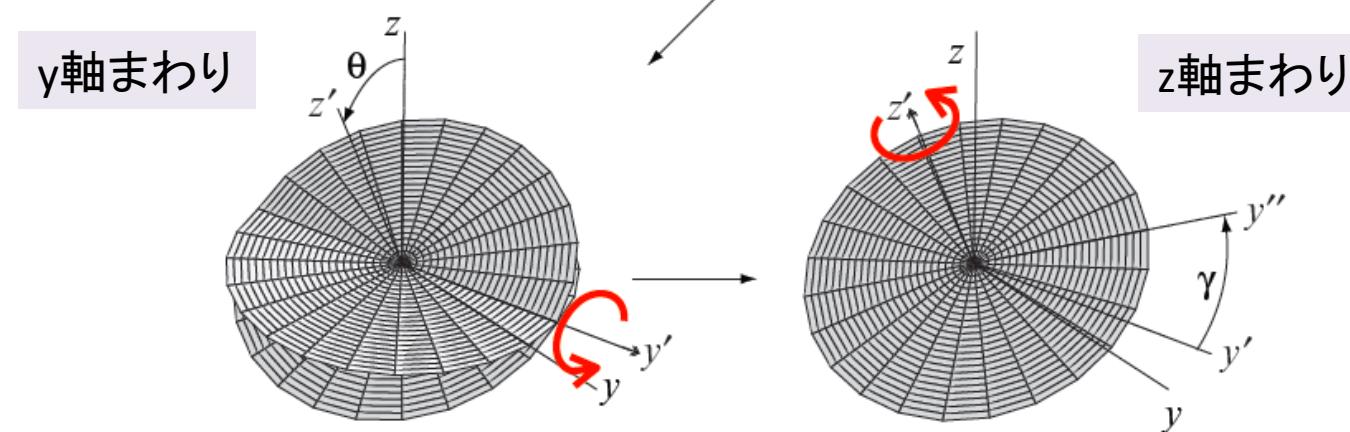
量子化軸の変換 (Euler rotation)

第2回後藤さん講義資料より

$$R(\phi, \theta, \gamma)$$



z 軸まわり



y 軸まわり

z 軸まわり

回転行列 (スピン1の場合)

古い座標系での固有状態

$Rz(\phi)$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ -1\rangle$
$\langle 1' $	$e^{i\phi}$	0	0
$\langle 0' $	0	1	0
$\langle -1' $	0	0	$e^{-i\phi}$

z 軸まわりの
回転行列

新しい座標系での固有状態
:phase shift.

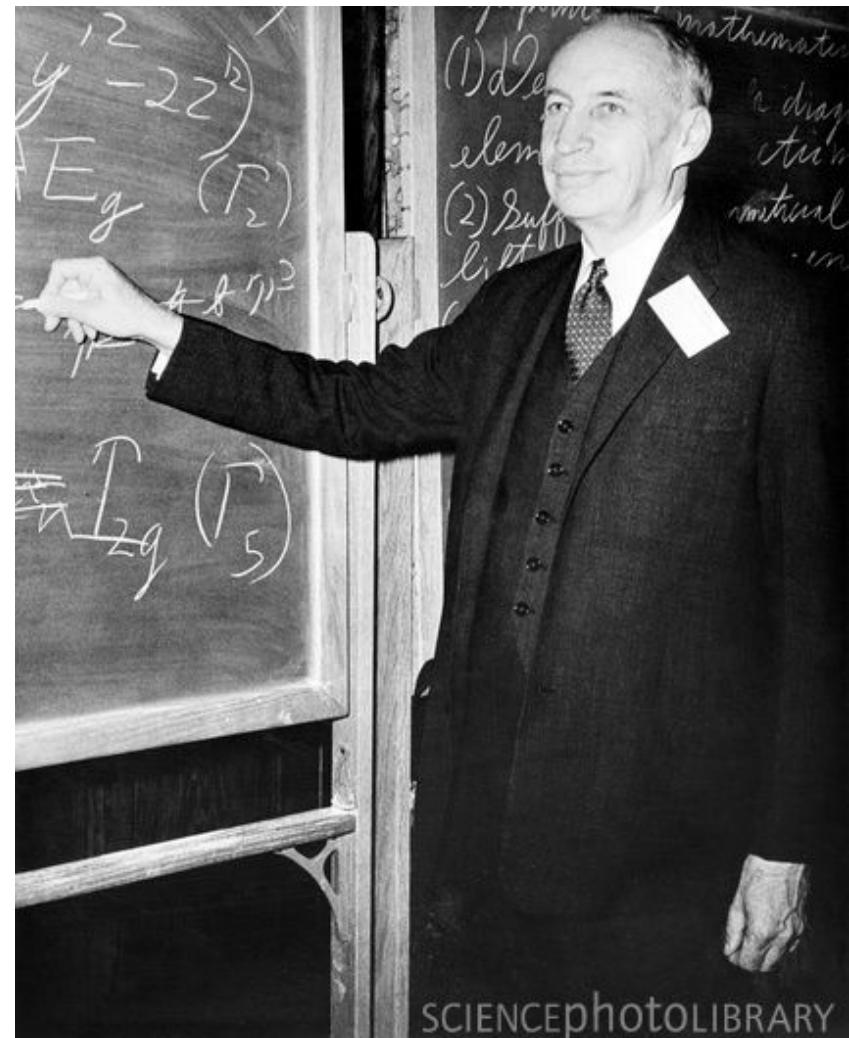
古い座標系での固有状態

y 軸まわりの
回転行列

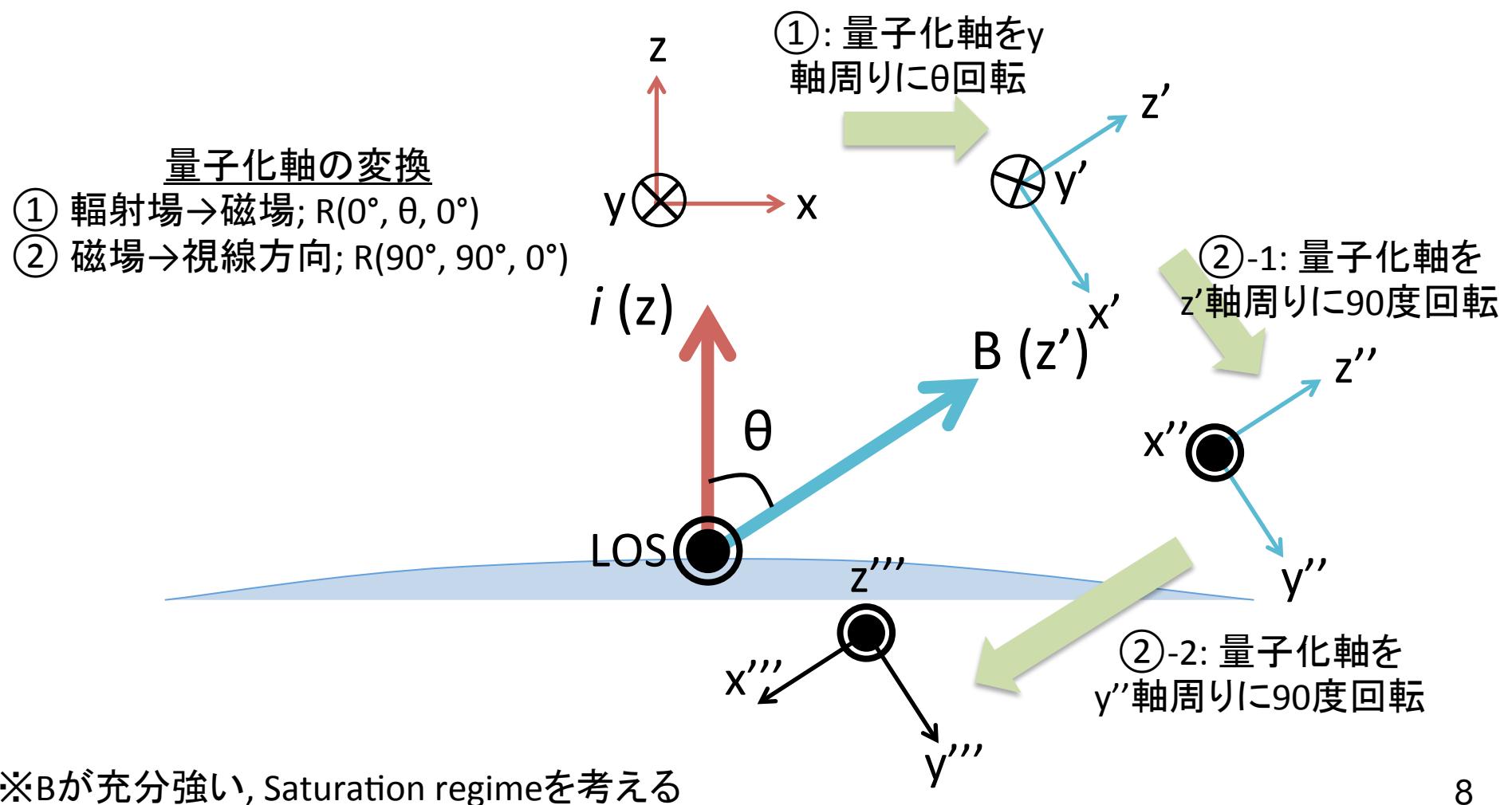
新しい座標系での固有状態
:古い座標系の固有状態の線形結合.

$Ry(\theta)$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ -1\rangle$
$\langle 1' $	$(1+\cos\theta)/2$	$\sin\theta/\sqrt{2}$	$(1-\cos\theta)/2$
$\langle 0' $	$-\sin\theta/\sqrt{2}$	$\cos\theta$	$\sin\theta/\sqrt{2}$
$\langle -1' $	$(1-\cos\theta)/2$	$-\sin\theta/\sqrt{2}$	$(1+\cos\theta)/2$

van Vleck angle



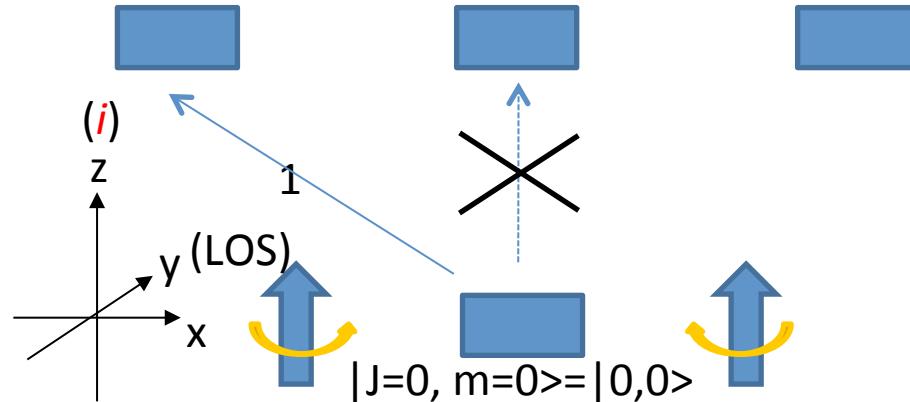
放射場の軸と磁場のなす角: θ



励起

Transition between $|0,0\rangle$ and $|1,1\rangle$

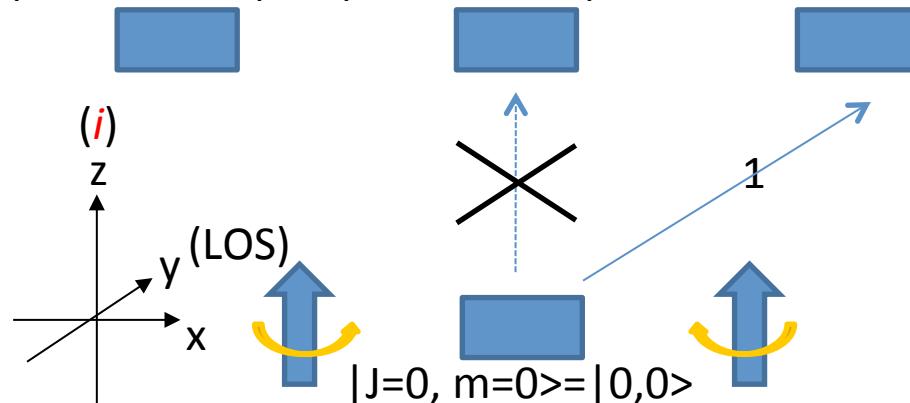
$$|J=1, m=1\rangle = |1\rangle \quad |J=1, m=0\rangle = |0\rangle \quad |J=1, m=-1\rangle = |-1\rangle$$



量子化軸を輻射場の向き(z軸)にとる。
角運動量保存則から, $|1,1\rangle$ への励起では, $|R\rangle$ が吸収され, $|1,-1\rangle$ への励起では,
 $|L\rangle$ が吸収される。

Transition between $|0,0\rangle$ and $|1,-1\rangle$

$$|J=1, m=1\rangle = |1\rangle \quad |J=1, m=0\rangle = |0\rangle \quad |J=1, m=-1\rangle = |-1\rangle$$



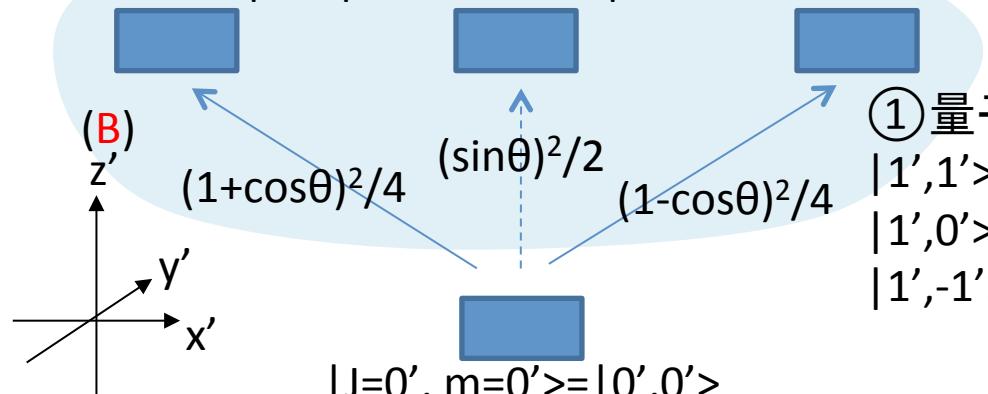
π transition

($|J=1, m=0\rangle$ to $|J=0, m=0\rangle$)はない。

B方向への量子化軸の変換

Transition between $|0',0'\rangle$ and $|1',1'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

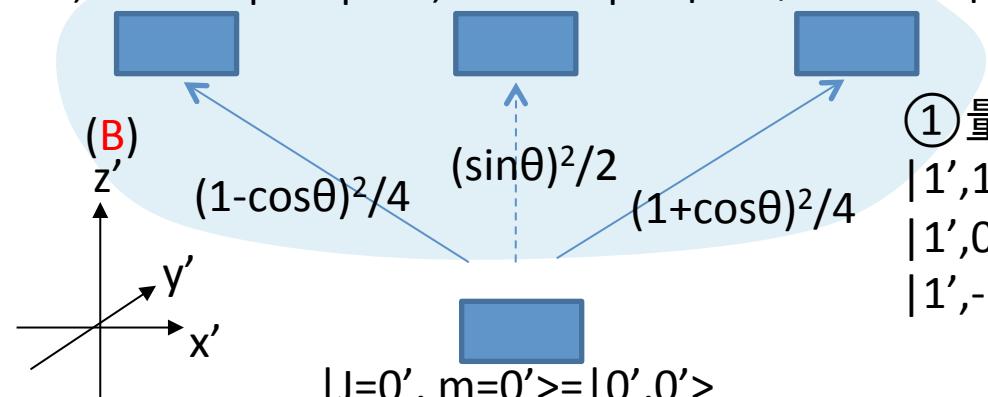


- ① 量子化軸を磁場方向に(量子化軸を θ 回転)
 $|1',1'\rangle = (1+\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle 1'|1'\rangle = (1+\cos\theta)^2/4$
 $|1',0'\rangle = -\sin\theta/\sqrt{2} |1\rangle \Rightarrow \langle 0'|0'\rangle = (\sin\theta)^2/2$
 $|1',-1'\rangle = (1-\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle -1'|-1'\rangle = (1-\cos\theta)^2/4$

$|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).

Transition between $|0',0'\rangle$ and $|1',-1'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



- ① 量子化軸を磁場方向に(量子化軸を θ 回転)
 $|1',1'\rangle = (1-\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle 1'|1'\rangle = (1-\cos\theta)^2/4$
 $|1',0'\rangle = -\sin\theta/\sqrt{2} |1\rangle \Rightarrow \langle 0'|0'\rangle = (\sin\theta)^2/2$
 $|1',-1'\rangle = (1+\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle -1'|-1'\rangle = (1+\cos\theta)^2/4$

$|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).

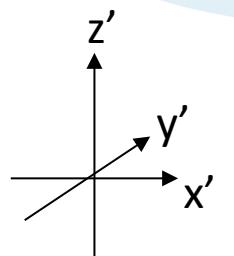
脱励起前のpopulation

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

$$(1+\cos^2\theta)/2 \quad (\sin\theta)^2 \quad (1+\cos^2\theta)/2$$

B=0のとき,
 $|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).

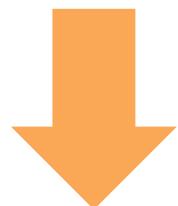


$$|J=0', m=0'\rangle = |0', 0'\rangle$$



各状態のpopulation

$$\langle 1', 1' | 1', 1' \rangle = (1+\cos\theta)^2/4 + (1-\cos\theta)^2/4 = (1+\cos^2\theta)/2$$
$$\langle 1', 0' | 1', 0' \rangle = \sin^2\theta/2 + \sin^2\theta/2 = \sin^2\theta$$
$$\langle 1', -1' | 1', -1' \rangle = (1-\cos\theta)^2/4 + (1+\cos\theta)^2/4 = (1-\cos^2\theta)/2$$



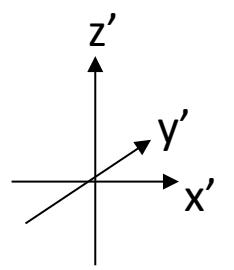
強Bによるcoherencyの破壊

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

$$(1+\cos^2\theta)/2 \quad (\sin\theta)^2 \quad (1+\cos^2\theta)/2$$

Bが十分強いとき,
 $|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ がincoherentに.
脱励起を各成分で考える.

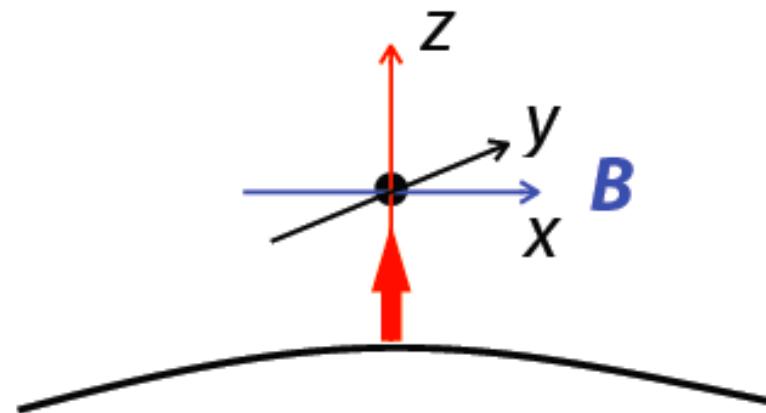


$$|J=0', m=0'\rangle = |0', 0'\rangle$$



量子化軸の変換で生じるcoherencyと 磁場の果たす役割 -density matrix-

第2回後藤さん講義資料より

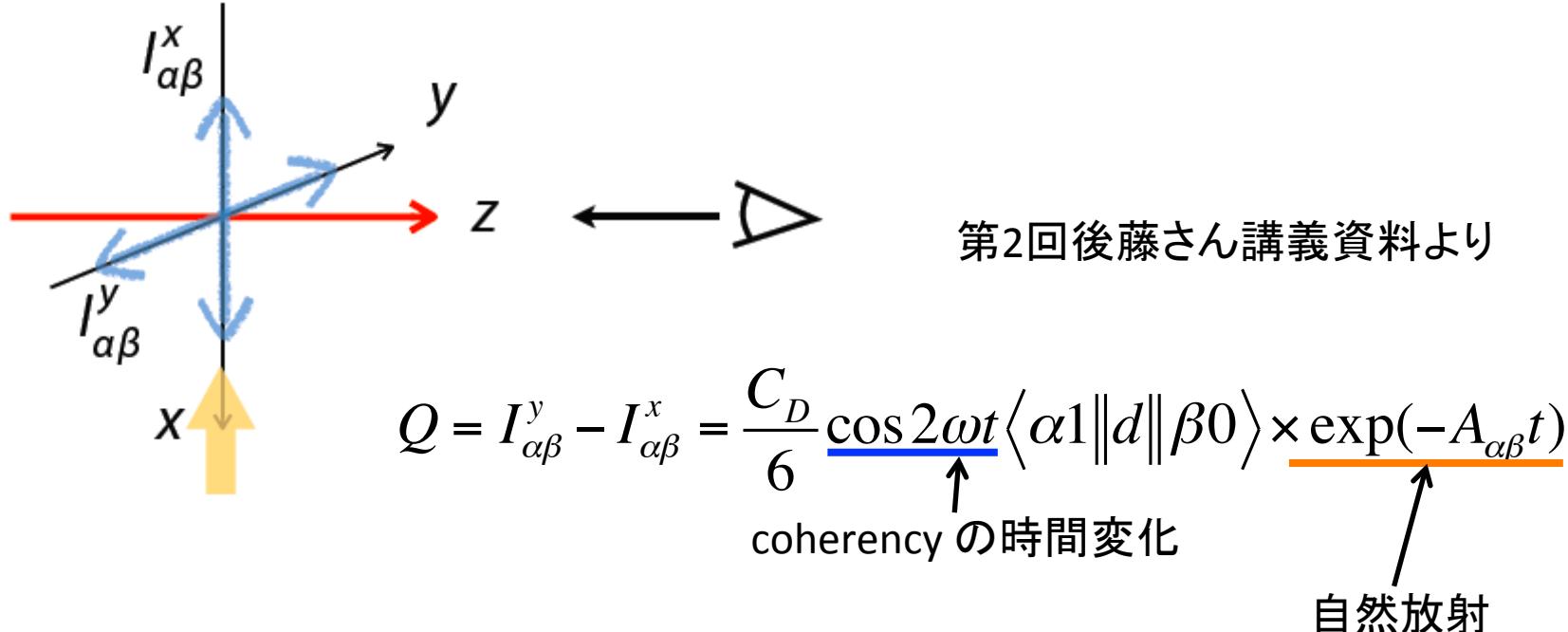


磁場(x軸)方向に量子化軸を
とった時のdensity matrix

$$\rho_x(t) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & e^{2i\omega t} & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ e^{-2i\omega t} & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

周期 $2\pi/\omega$ でcoherencyが変化

$$\omega = \frac{e}{2m} g_J B$$



$2\pi/\omega \gg 1/A_{\alpha\beta}$ (磁場が十分弱いとき)

あるCoherencyを保ったまま, 脱励起 \Rightarrow atomic polarizationの検出

$2\pi/\omega \ll 1/A_{\alpha\beta}$ (磁場が十分強いとき)

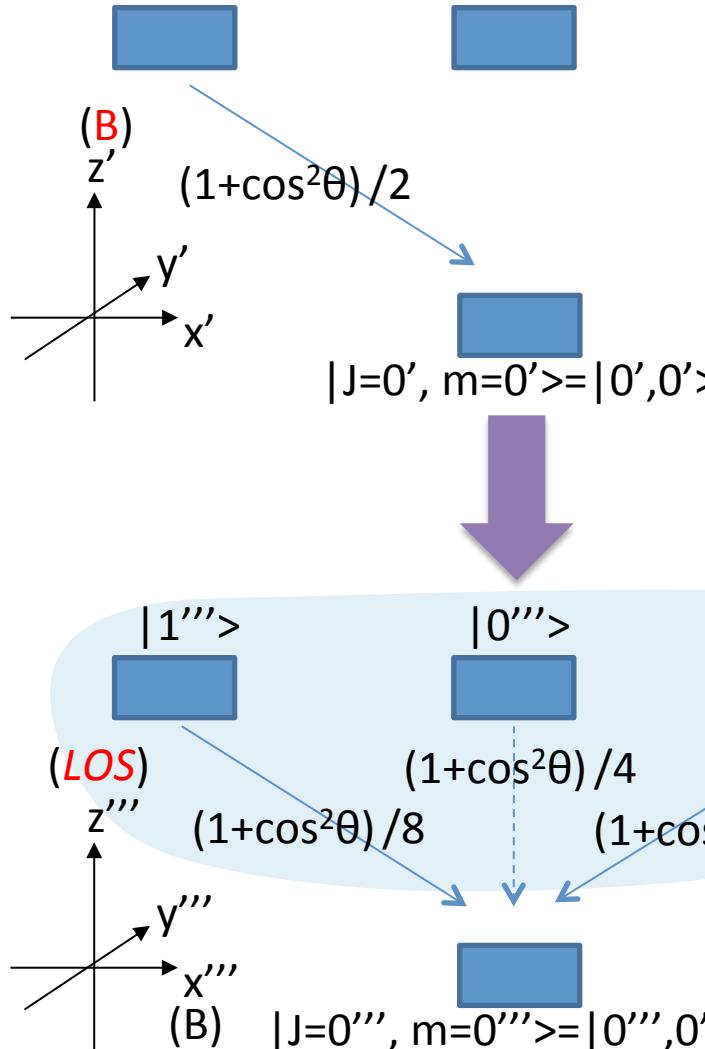
いろいろなCoherencyを持ったphotonが重なりあう \Rightarrow 無偏光

時間変化については扱えないこの枠組内では.....
 磁場が十分に強い時, Density matrixの非対角成分が無視でき,
 状態間にcoherencyが存在しなくなると考える.

脱励起 $|1',1'\rangle$

Transition between $|1',1'\rangle$ and $|0',0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



※各成分ごとに考える

量子化軸を z' 軸まわりに 90° 回転し、さらに y'' 軸周りに 90° 回転。

$$|1'''> = (1+\cos 90^\circ)/2 * \exp(i\pi/2) |1'\rangle = i/2 |1'\rangle$$

$$\Rightarrow <1'''|1'''> = (1+\cos^2\theta)/8$$

$$|0'''> = -\sin 90^\circ / \sqrt{2} * \exp(i\pi/2) |1'\rangle = -i/\sqrt{2} |1'\rangle$$

$$\Rightarrow <0'''|0'''> = (1+\cos^2\theta)^2/4$$

$$|-1'''> = (1-\cos 90^\circ)/2 * \exp(i\pi/2) |1'\rangle = i/2 |1'\rangle$$

$$\Rightarrow <-1'''|-1'''> = (1+\cos^2\theta)/8$$

角運動量保存則より、 $|1''',0'''> \rightarrow |0''',0'''>$ 遷移による光子は視線方向(z'' 軸)には放射されない。

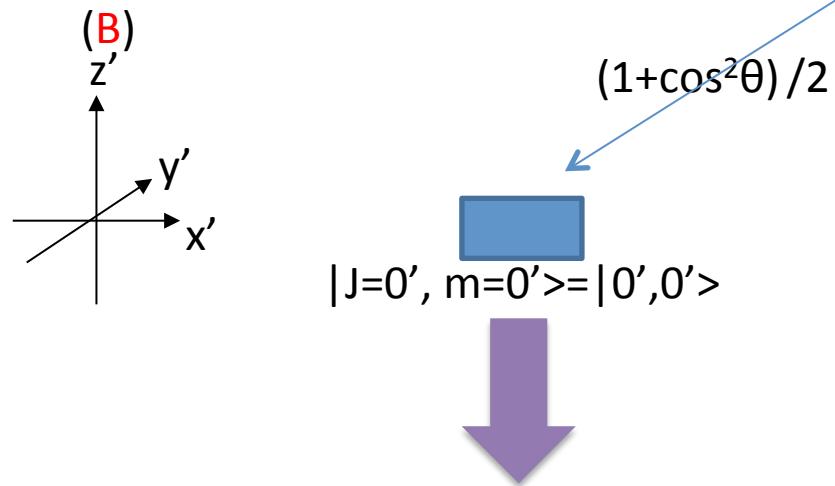
結果として、 $|1'''>$ と $|-1'''>$ が同位相化 (coherency の発生)。放出される光子は、 $(|R\rangle + |L\rangle)$ で記述される磁場に垂直な(y''' 方向) 直線偏光。

脱励起 $|1', -1'\rangle$

※各成分ごとに考える

Transition between $|1', -1'\rangle$ and $|0', 0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



量子化軸を z' 軸まわりに 90° 回転し、さらに y'' 軸周りに 90° 回転。

$$|1'''\rangle = (1-\cos 90^\circ)/2 * \exp(i\pi/2) |-1'\rangle = i/2 |-1'\rangle$$

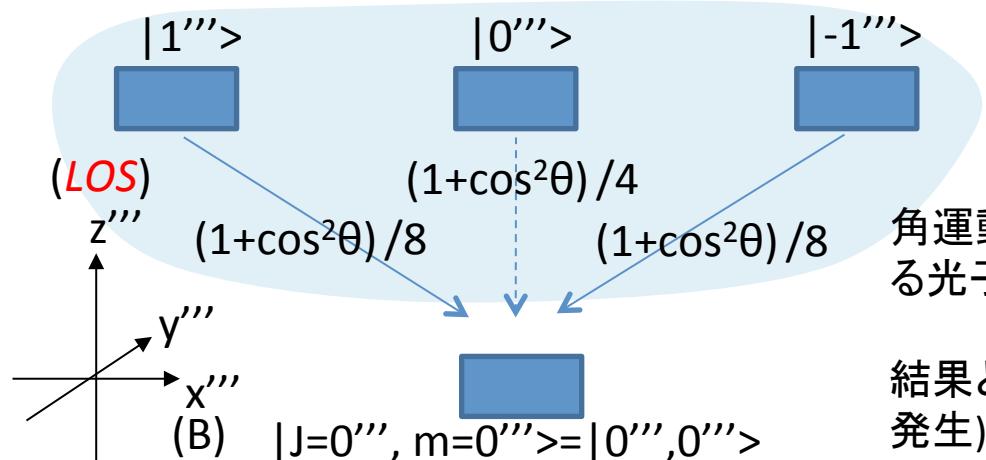
$$\Leftrightarrow \langle 1''' | 1'''\rangle = (1+\cos^2 \theta)/8$$

$$|0'''\rangle = \sin 90^\circ / \sqrt{2} * \exp(i\pi/2) |1'\rangle = i/\sqrt{2} |1'\rangle$$

$$\Leftrightarrow \langle 0''' | 0'''\rangle = (1+\cos^2 \theta)^2/4$$

$$|-1'''\rangle = (1+\cos 90^\circ)/2 * \exp(i\pi/2) |1'\rangle = i/2 |1'\rangle$$

$$\Leftrightarrow \langle -1''' | -1'''\rangle = (1+\cos^2 \theta)/8$$



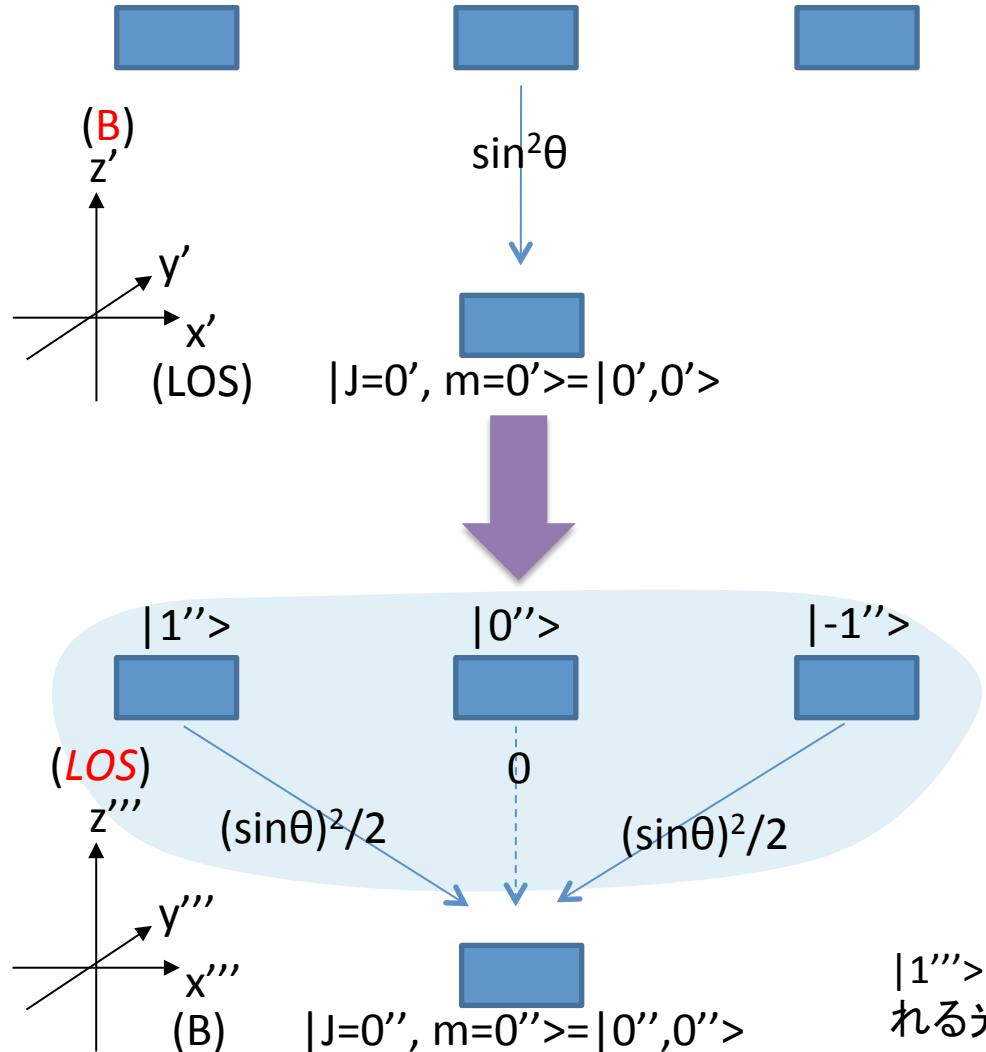
角運動量保存則より、 $|1''', 0'''\rangle \rightarrow |0''', 0'''\rangle$ 遷移による光子は視線方向(z'' 軸)には放射されない。

結果として、 $|1'''\rangle$ と $|-1'''\rangle$ が同位相化 (coherency の発生)。放出される光子は、 $(|R\rangle + |L\rangle)$ で記述される磁場に垂直な(y''' 方向) 直線偏光。

脱励起 $|1',0'\rangle$

Transition between $|1',-1'\rangle$ and $|0',0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



※各成分ごとに考える

量子化軸を z' 軸まわりに 90° 回転し、さらに y'' 軸周りに 90° 回転。

$$|1'''\rangle = (\sin 90^\circ)/\sqrt{2} |0'\rangle = 1/\sqrt{2} |0'\rangle$$

$$\Leftrightarrow \langle 1''' | 1'''\rangle = (\sin^2 \theta)/2$$

$$|0'''\rangle = \cos 90^\circ |0'\rangle = 0$$

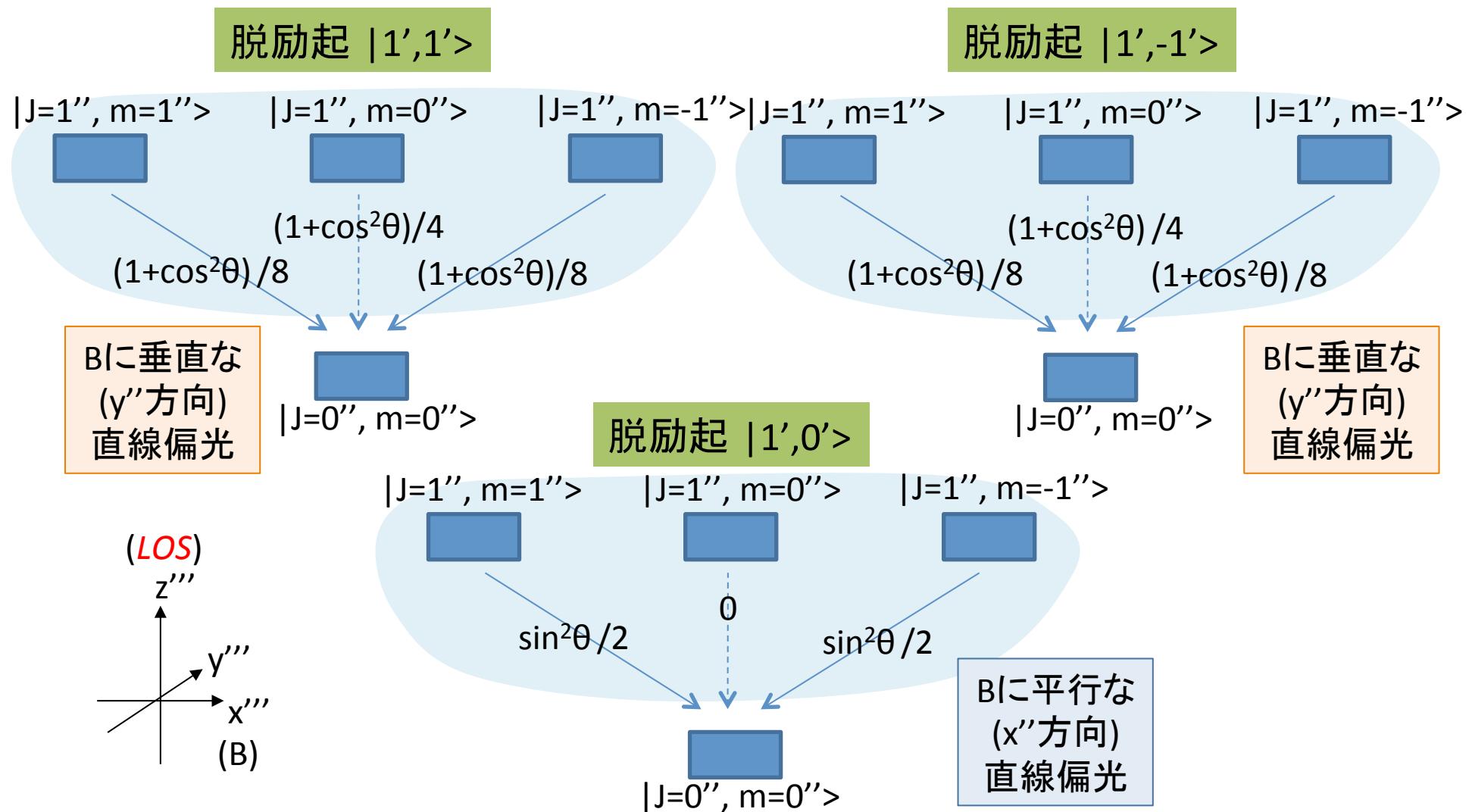
$$\Leftrightarrow \langle 0''' | 0'''\rangle = 0$$

$$|-1'''\rangle = -\sin 90^\circ / \sqrt{2} |0'\rangle = -1/\sqrt{2} |0'\rangle$$

$$\Leftrightarrow \langle -1''' | -1'''\rangle = (\sin^2 \theta)/2$$

$|1'''\rangle$ と $|-1'''\rangle$ が同位相化 (coherencyの発生). 放出される光子は, $(|R\rangle - |L\rangle)$ で記述される磁場に平行な (x''' 方向) 直線偏光。

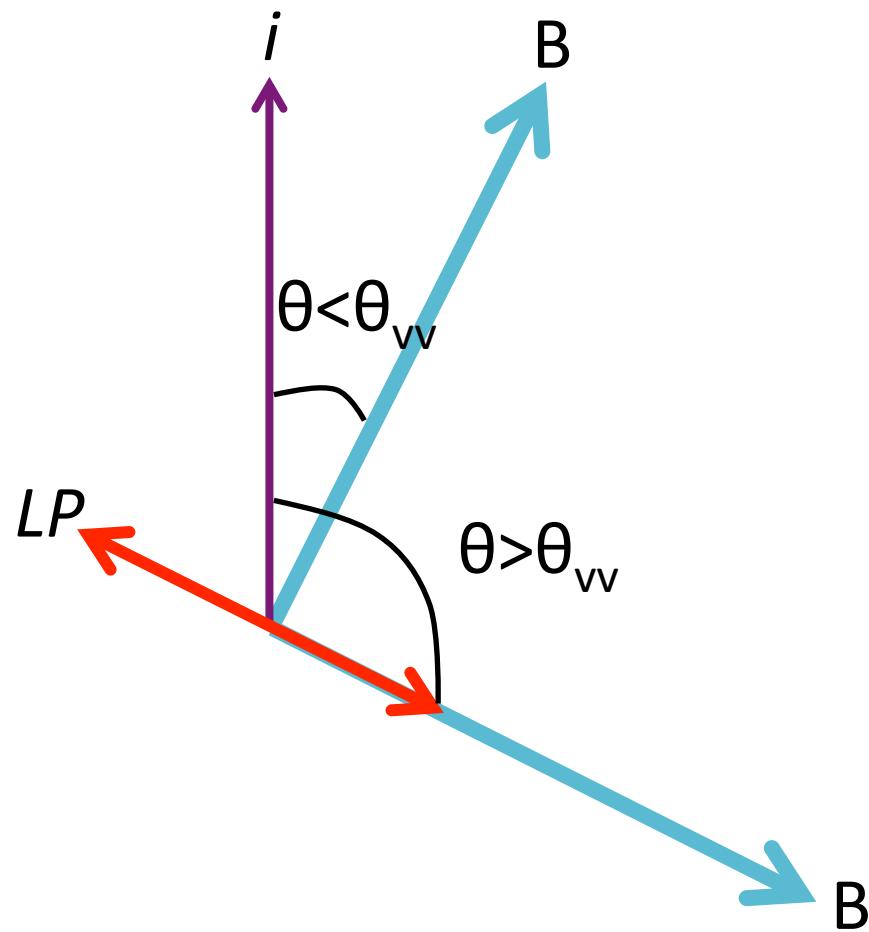
まとめ

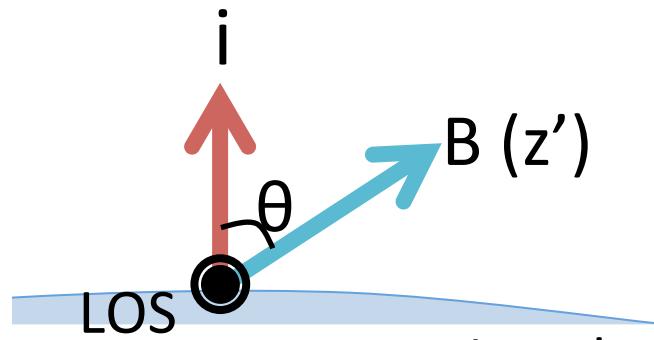


$$Q = \leftrightarrow - \updownarrow = ((1+\cos^2\theta)/8 + (1+\cos^2\theta)/8) - (\sin^2\theta)/2 = (3\cos^2\theta - 1)/4$$

$$\theta < \theta_{vv} \Rightarrow Q \perp B, \quad \theta > \theta_{vv} \Rightarrow Q // B \quad (\theta_{vv} = 54.7^\circ)$$

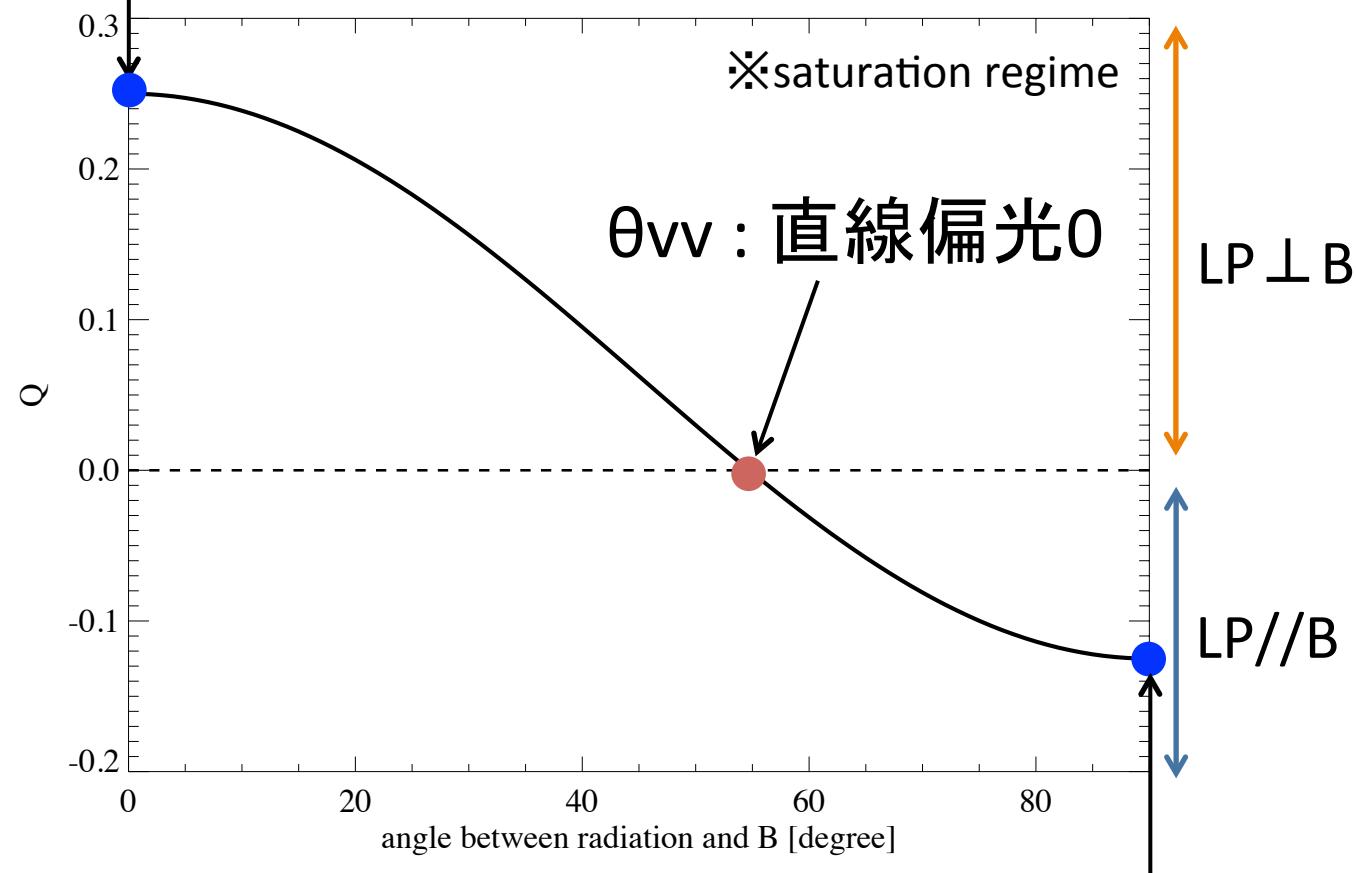
Van Vleck ambiguity





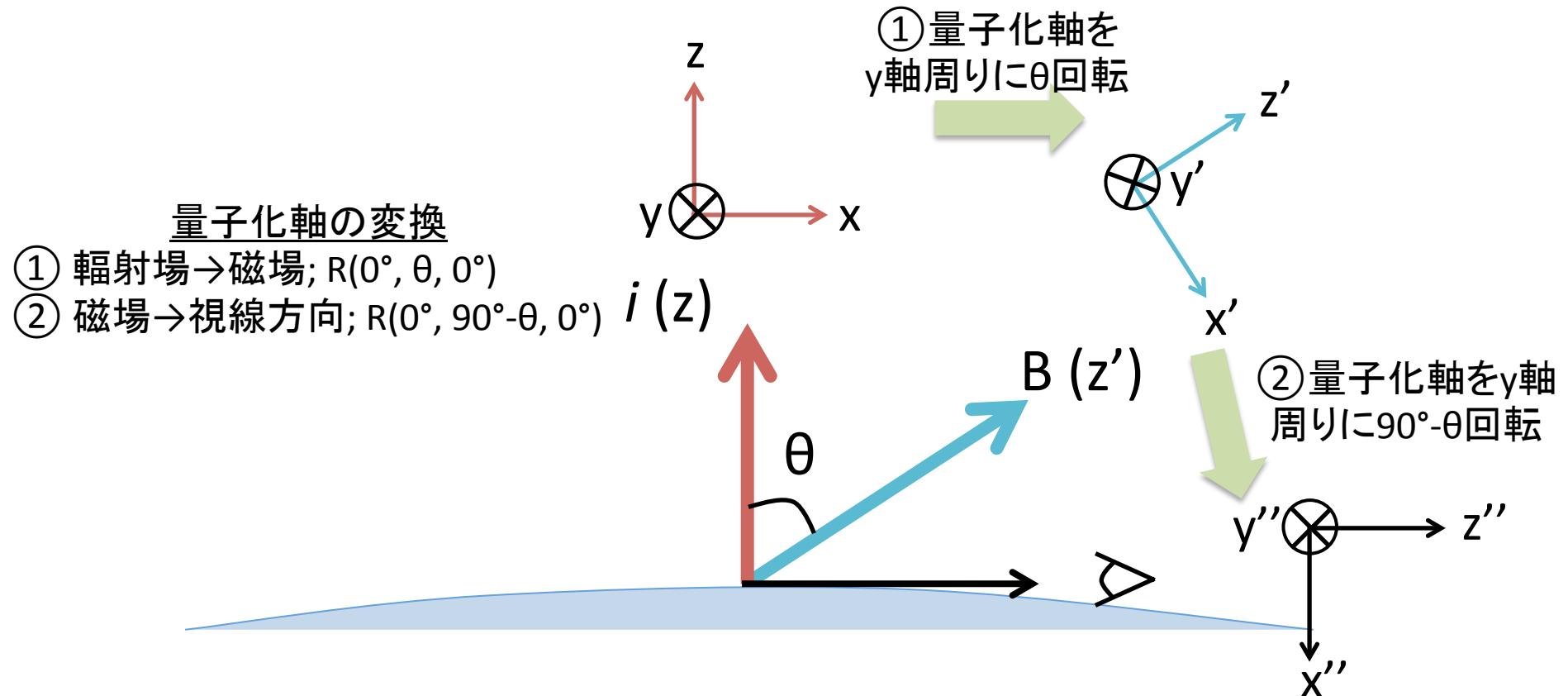
磁場の向きと直線偏光度

atomic polarizationのみ (リムに平行な直線偏光)

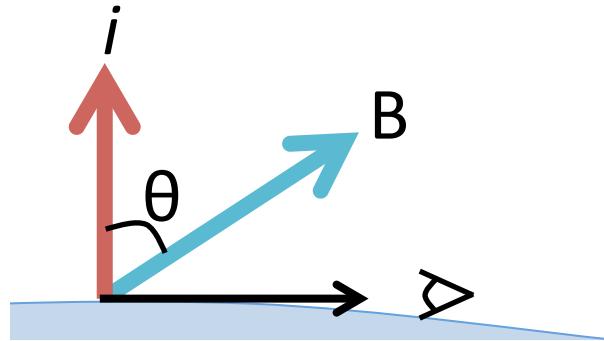


直線偏光の向きは磁場・リムに平行。
($\theta=0$ と比べて偏光度は減少) ¹⁹

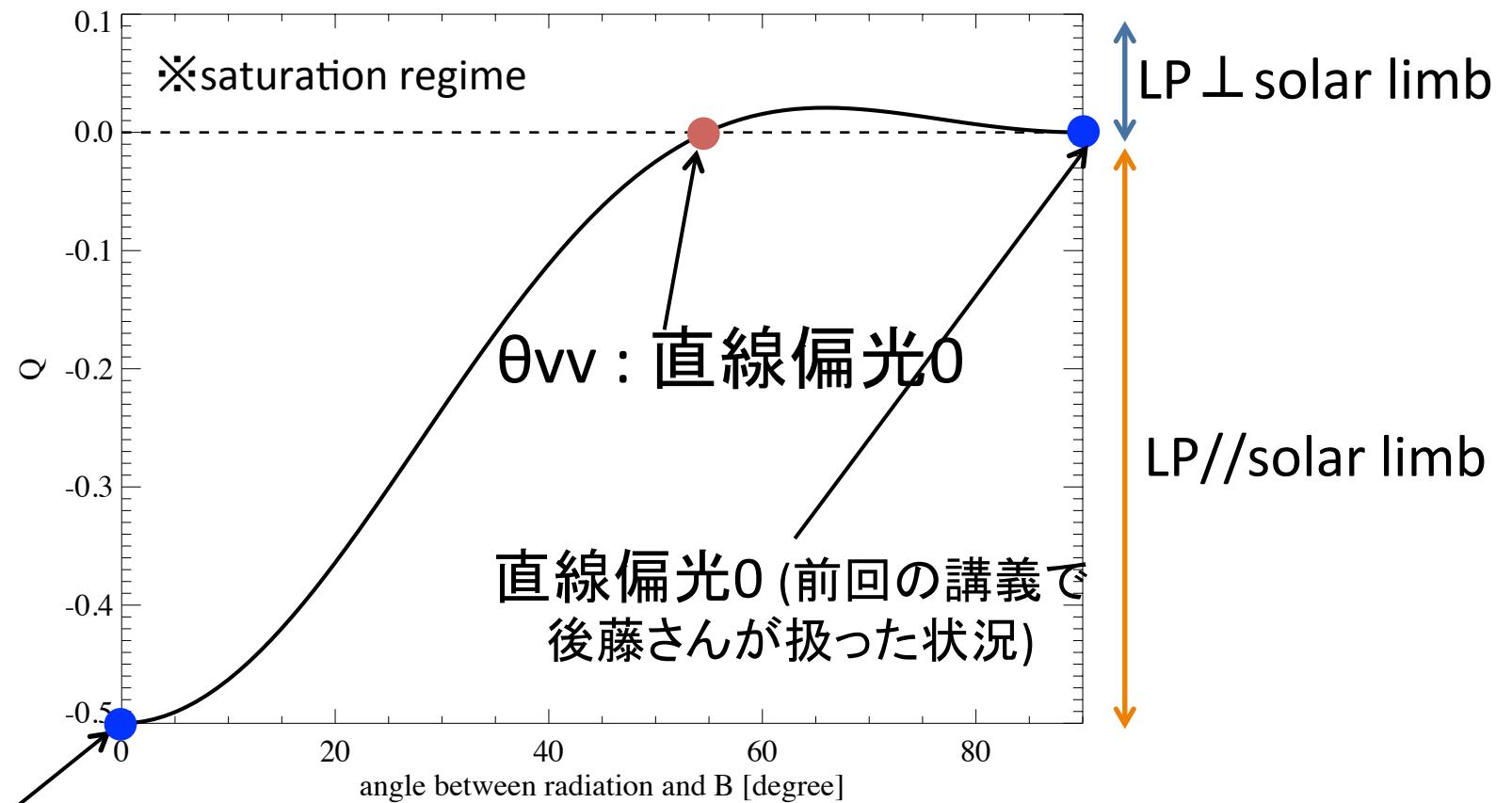
放射場の軸と磁場のなす角:θ



※ B が充分強い, Saturation regimeを考える



磁場の向きと直線偏光度



atomic polarizationのみ
(リムに平行な直線偏光)

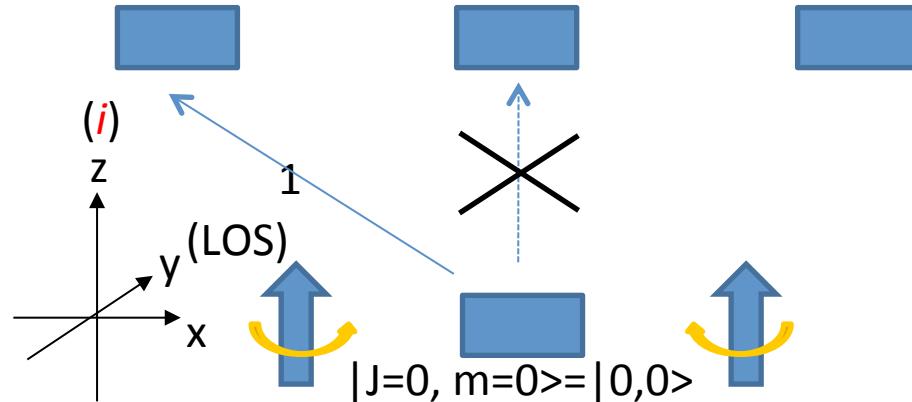
※計算過程はBack upにあり

Back up

励起

Transition between $|0,0\rangle$ and $|1,1\rangle$

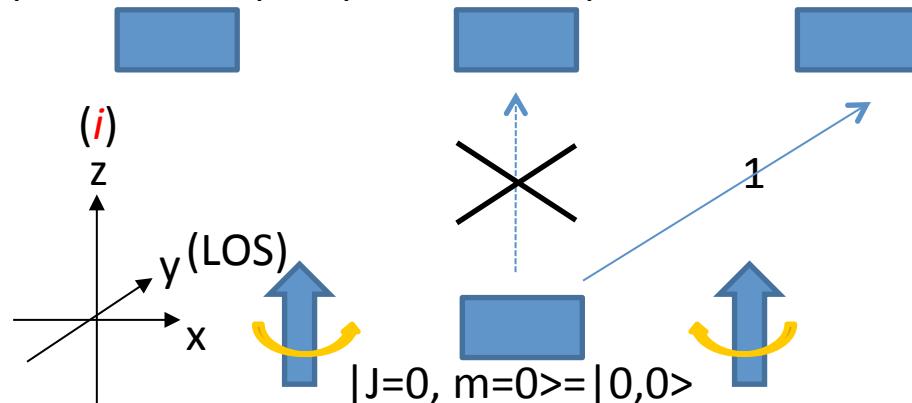
$$|J=1, m=1\rangle = |1\rangle \quad |J=1, m=0\rangle = |0\rangle \quad |J=1, m=-1\rangle = |-1\rangle$$



量子化軸を輻射場の向き(z軸)にとる。
角運動量保存則から, $|1,1\rangle$ への励起では, $|R\rangle$ が吸収され, $|1,-1\rangle$ への励起では,
 $|L\rangle$ が吸収される。

Transition between $|0,0\rangle$ and $|1,-1\rangle$

$$|J=1, m=1\rangle = |1\rangle \quad |J=1, m=0\rangle = |0\rangle \quad |J=1, m=-1\rangle = |-1\rangle$$



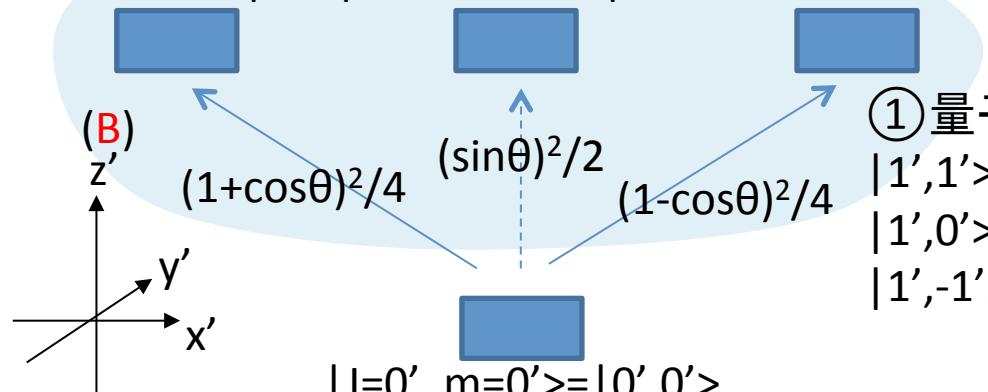
π transition

($|J=1, m=0\rangle$ to $|J=0, m=0\rangle$)はない。

B方向への量子化軸の変換

Transition between $|0',0'\rangle$ and $|1',1'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

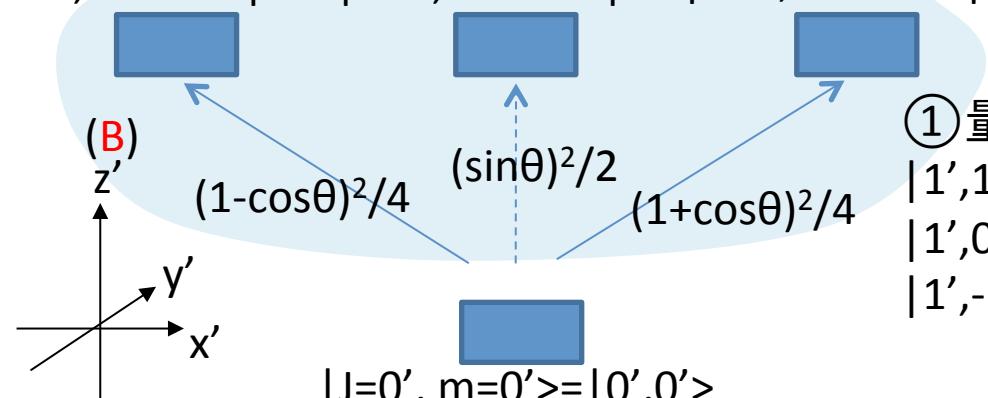


- ① 量子化軸を磁場方向に(量子化軸を θ 回転)
 $|1',1'\rangle = (1+\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle 1'|1'\rangle = (1+\cos\theta)^2/4$
 $|1',0'\rangle = -\sin\theta/\sqrt{2} |1\rangle \Rightarrow \langle 0'|0'\rangle = (\sin\theta)^2/2$
 $|1',-1'\rangle = (1-\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle -1'|-1'\rangle = (1-\cos\theta)^2/4$

$|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).

Transition between $|0',0'\rangle$ and $|1',-1'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



- ① 量子化軸を磁場方向に(量子化軸を θ 回転)
 $|1',1'\rangle = (1-\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle 1'|1'\rangle = (1-\cos\theta)^2/4$
 $|1',0'\rangle = \sin\theta/\sqrt{2} |1\rangle \Rightarrow \langle 0'|0'\rangle = (\sin\theta)^2/2$
 $|1',-1'\rangle = (1+\cos\theta)/2 |1\rangle \Rightarrow \langle -1'|-1'\rangle = (1+\cos\theta)^2/4$

$|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).

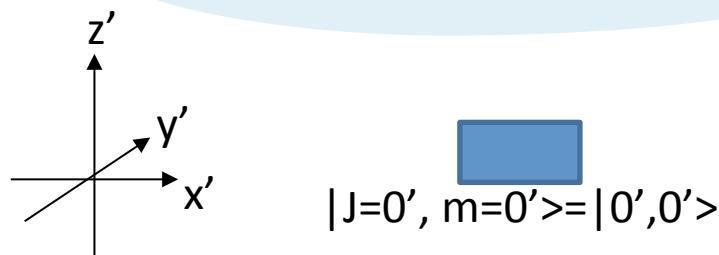
脱励起前のpopulation

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

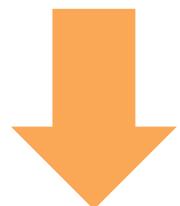
$$(1+\cos^2\theta)/2 \quad (\sin\theta)^2 \quad (1+\cos^2\theta)/2$$

B=0のとき,
 $|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ が同位相化
(=atomic coherencyの発生).



各状態のpopulation

$$\langle 1', 1' | 1', 1' \rangle = (1+\cos\theta)^2/4 + (1-\cos\theta)^2/4 = (1+\cos^2\theta)/2$$
$$\langle 1', 0' | 1', 0' \rangle = \sin^2\theta/2 + \sin^2\theta/2 = \sin^2\theta$$
$$\langle 1', -1' | 1', -1' \rangle = (1-\cos\theta)^2/4 + (1+\cos\theta)^2/4 = (1-\cos^2\theta)/2$$



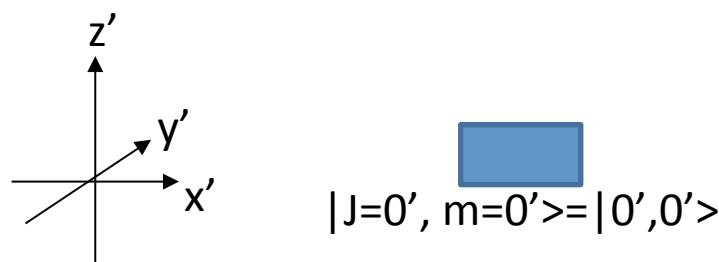
強Bによるcoherencyの破壊

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

$$(1+\cos^2\theta)/2 \quad (\sin\theta)^2 \quad (1+\cos^2\theta)/2$$

Bが十分強いとき,
 $|1'\rangle, |0'\rangle, |-1'\rangle$ がincoherentに.
脱励起を各成分で考える.

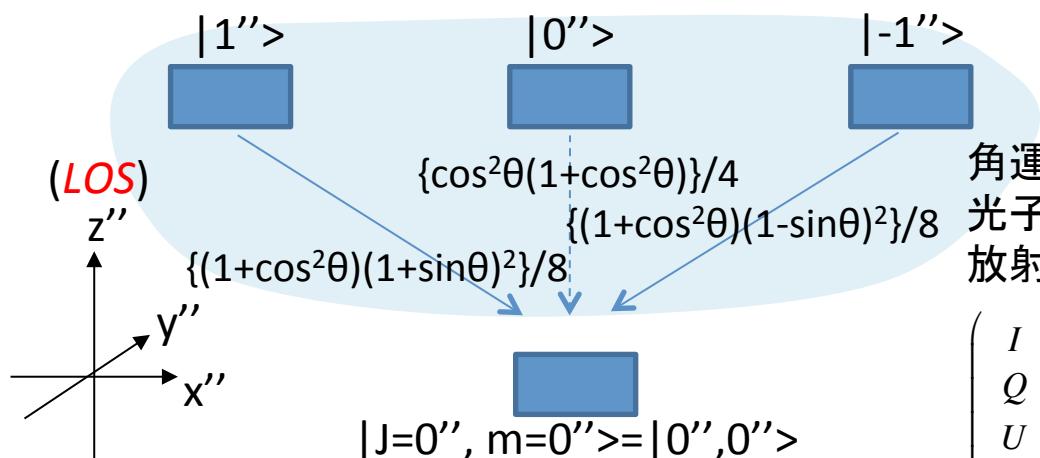
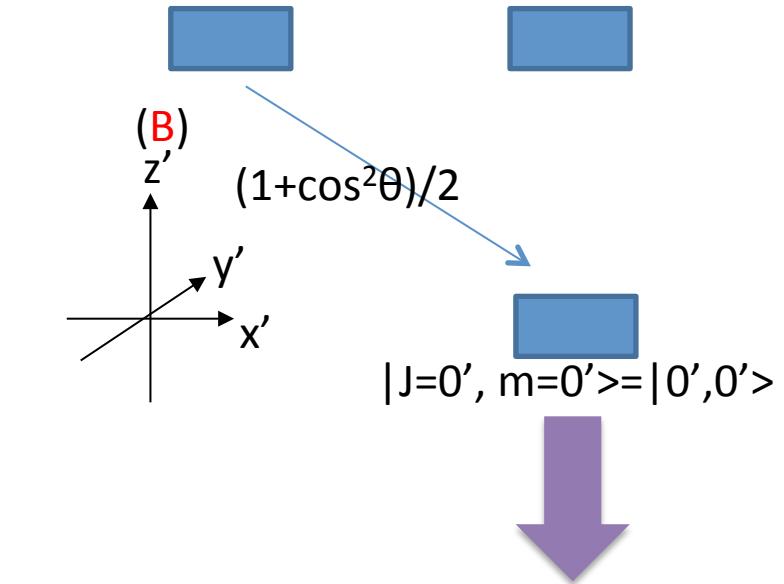


脱励起 $|1',1'\rangle$

Transition between $|1',1'\rangle$ and $|0',0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

※各成分ごとに考える



量子化軸を $90^\circ - \theta$ 回転.

$$\begin{aligned} |1''\rangle &= (1+\sin\theta)/2 |1'\rangle \Rightarrow \langle 1'' | 1'' \rangle = \{(1+\cos^2\theta)(1+\sin\theta)^2\}/8 \\ |0''\rangle &= -\cos\theta/\sqrt{2} |1'\rangle \Rightarrow \langle 0'' | 0'' \rangle = \{\cos^2\theta(1+\cos^2\theta)\}/4 \\ |-1''\rangle &= (1-\sin\theta)/2 |1'\rangle \Rightarrow \langle -1'' | -1'' \rangle = \{(1+\cos^2\theta)(1-\sin\theta)^2\}/8 \end{aligned}$$

角運動量保存則より, $|1'',0''\rangle \rightarrow |0'',0''\rangle$ 遷移による
光子は視線方向(z'' 軸)には放射されない.
放射光のストークスベクトルは,

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} (1+\cos^2\theta)(1+\sin^2\theta) \\ -(1+\cos^2\theta)(1-\sin^2\theta) \\ 0 \\ 2\sin\theta(1+\cos^2\theta) \end{pmatrix}$$

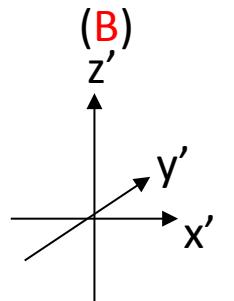
$+Q$ は x'' 軸方向
(リムに垂直)

脱励起 $|1', -1'\rangle$

※各成分ごとに考える

Transition between $|1', -1'\rangle$ and $|0', 0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$



$$|J=0', m=0'\rangle = |0', 0'\rangle$$

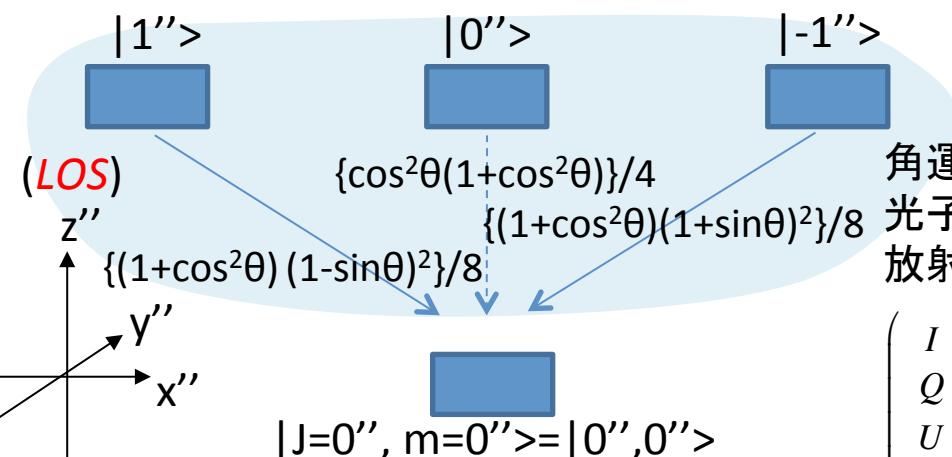
$$(1+\cos\theta)^2/2$$

量子化軸を $90^\circ - \theta$ 回転.

$$|1''\rangle = (1-\sin\theta)/2 \quad |-1'\rangle \Rightarrow \langle 1'' | 1'' \rangle = \{(1+\cos^2\theta)(1-\sin\theta)^2\}/8$$

$$|0''\rangle = \cos\theta/\sqrt{2} \quad |-1'\rangle \Rightarrow \langle 0'' | 0'' \rangle = \{\cos^2\theta(1+\cos^2\theta)\}/4$$

$$|-1''\rangle = (1+\sin\theta)/2 \quad |-1'\rangle \Rightarrow \langle -1'' | -1'' \rangle = \{(1+\cos^2\theta)(1+\sin\theta)^2\}/8$$



$$\{\cos^2\theta(1+\cos^2\theta)\}/4$$

$$\{(1+\cos^2\theta)(1+\sin\theta)^2\}/8$$

角運動量保存則より, $|1'', 0''\rangle \rightarrow |0'', 0''\rangle$ 遷移による
光子は視線方向(z'' 軸)には放射されない.
放射光のストークスベクトルは,

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} (1+\cos^2\theta)(1+\sin^2\theta) \\ -(1+\cos^2\theta)(1-\sin^2\theta) \\ 0 \\ -2\sin\theta(1+\cos^2\theta) \end{pmatrix}$$

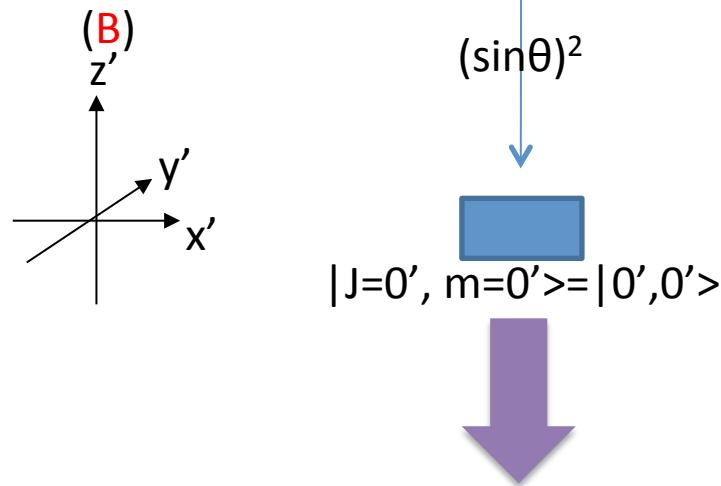
$+Q$ は x'' 軸方向
(リムに垂直)

脱励起 $|1',0'\rangle$

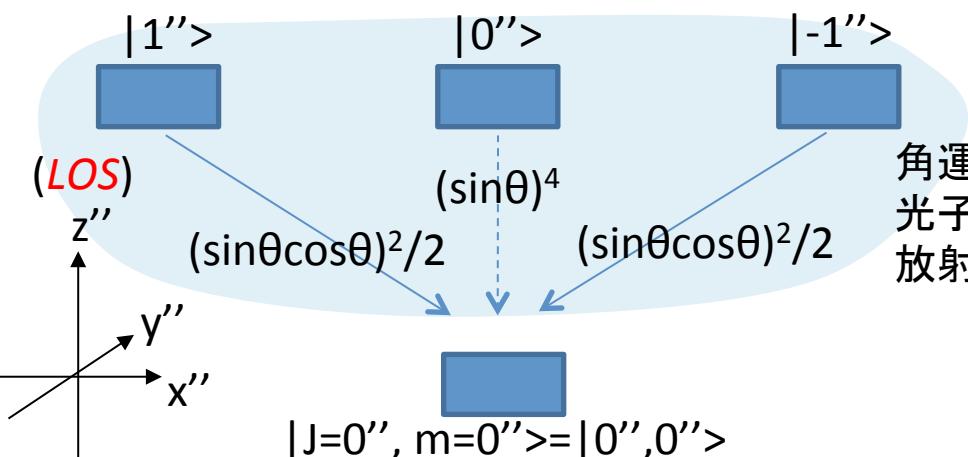
Transition between $|1',-1'\rangle$ and $|0',0'\rangle$

$$|J=1', m=1'\rangle = |1'\rangle \quad |J=1', m=0'\rangle = |0'\rangle \quad |J=1', m=-1'\rangle = |-1'\rangle$$

※各成分ごとに考える



強いBによりCoherencyがなくなる。各成分ごとを考える。



量子化軸を視線方向に90°回転。

$$|1''\rangle = \cos\theta/\sqrt{2} |0'\rangle \Rightarrow \langle 1'' | 1'' \rangle = (\sin\theta \cos\theta)^2 / 2$$

$$|0''\rangle = \sin\theta |0'\rangle \Rightarrow \langle 0'' | 0'' \rangle = (\sin\theta)^4$$

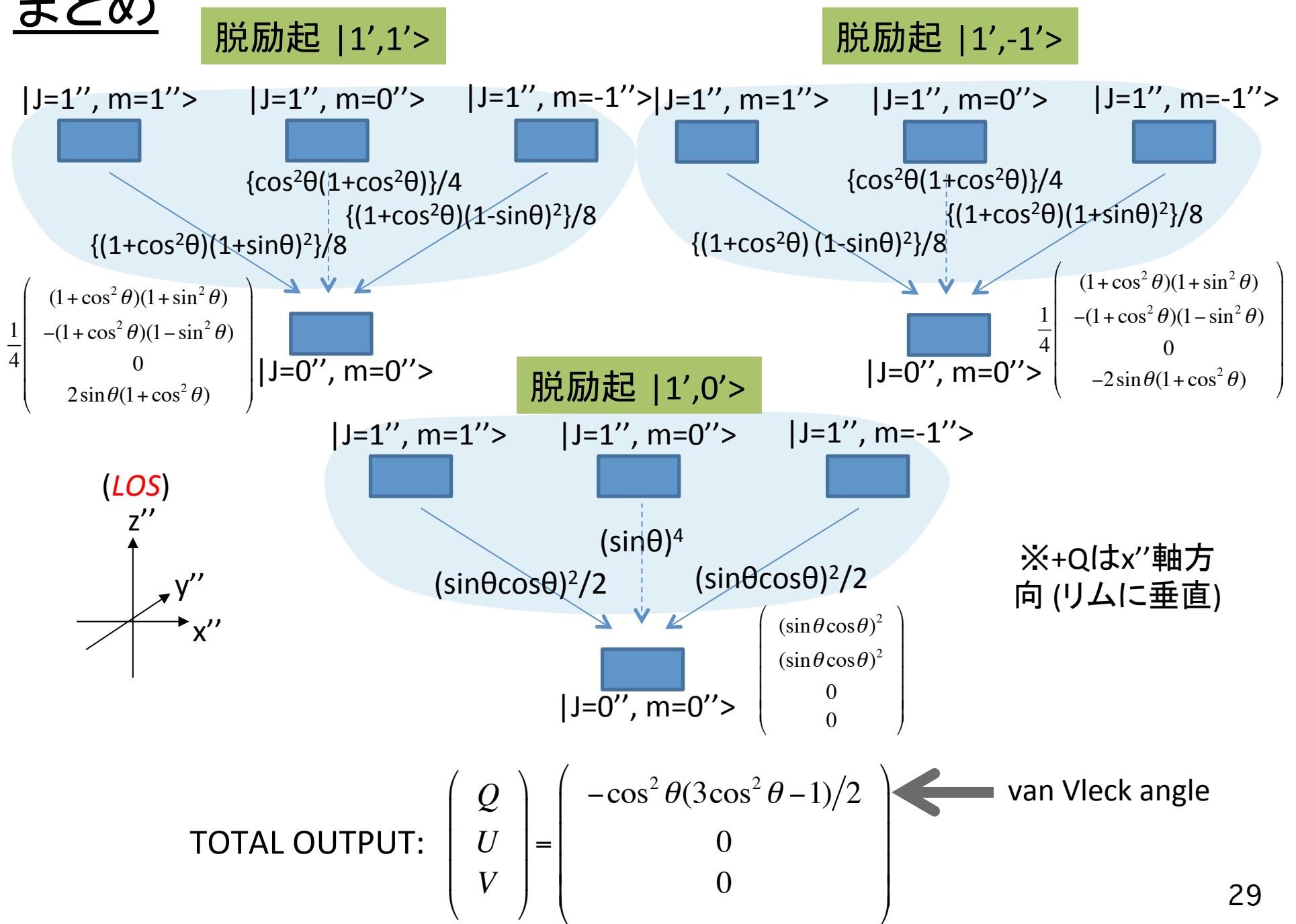
$$|-1''\rangle = -\cos\theta/\sqrt{2} |0'\rangle \Rightarrow \langle -1'' | -1'' \rangle = (\sin\theta \cos\theta)^2 / 2$$

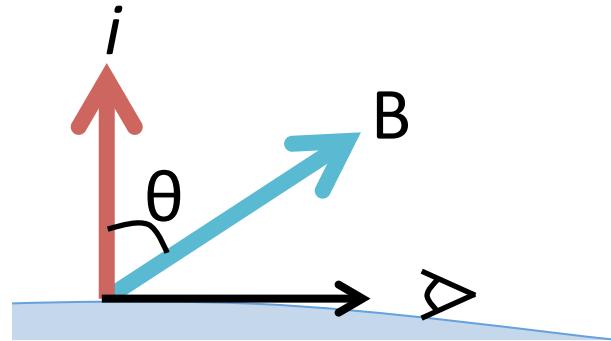
角運動量保存則より、 $|1'',0''\rangle \rightarrow |0'',0''\rangle$ 遷移による光子は視線方向(z''軸)には放射されない。
放射光のストークスペクトルは、

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\sin\theta \cos\theta)^2 \\ (\sin\theta \cos\theta)^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

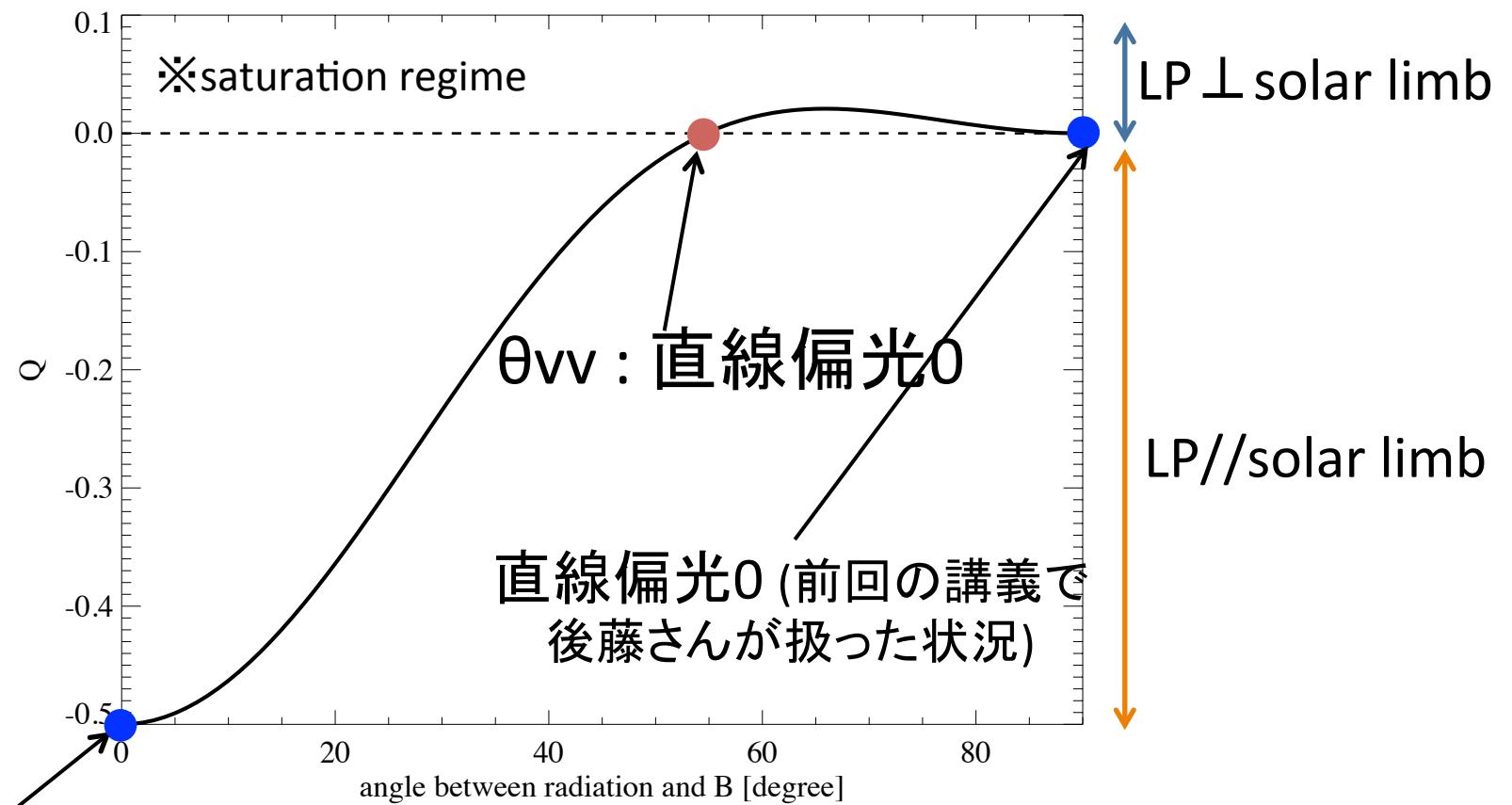
+Qはx''軸方向
(リムに垂直)

まとめ





磁場の向きと直線偏光度



atomic polarizationのみ
(リムに平行な直線偏光)