

Marco Tarini - Computer Graphics 2024/2025
Università degli Studi di Milano

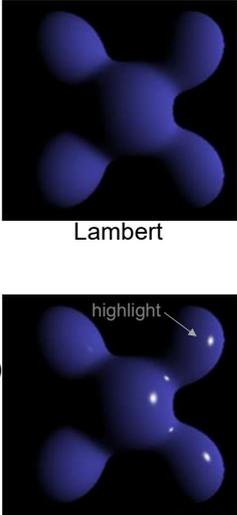
Lighting 2/2: modello di Phong



55

Limiti del modello di Lambert

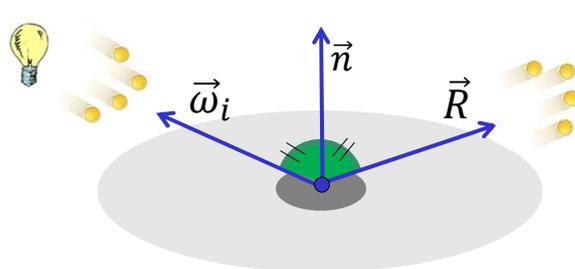
- ✓ Un materiale Lambertiano riproduce solo l'aspetto materiali opachi (dull) privi di riflessi luminosi
 - ⇒ ma, almeno, lo fa in modo fisicamente corretto
- ✓ Di seguito, vediamo il modello di lighting detto di Phong, capace di riprodurre anche l'aspetto di superfici lucide
 - ⇒ come quelle bagnate, levigate, incerate, etc,
 - ⇒ aggiungendo al lighting Lambertiano riflessi lucidi (detti *highlight*, *specular reflection*, o *glossy reflection*)
- ✓ Il modello di Phong, tuttavia...
 - ⇒ non è ispirato da considerazioni fisiche;
 - ⇒ non è confermato da misurazione radiometriche;
 - ⇒ è basato su una costruzione geometrica molto approssimata (ed efficiente)



68

Modello di illuminazione di Phong: la spiegazione spaziale intuitiva

- ✓ In presenza di un materiale molto levigato / liscio / lucido, i fotoni tenderanno a rimbalzare sulla superficie (riflessione) in modo simile a quello di una pallina da ping-pong su un tavolo



Nota:
I tre vettori
mostrati
sono
co-planari

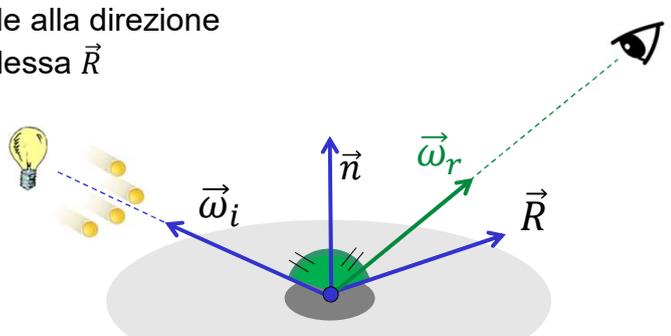
- ✓ Intuizione: la BRDF di un materiale lucido manderà un numero maggiore dei fotoni provenienti dalla direzione $\vec{\omega}_i$ nella direzione riflessa \vec{R} , che non nelle altre direzioni
⇒ a differenza di quella di un materiale diffusivo / lambertiano, che li rimbalza in qualsiasi direzione con uguale probabilità



69

Modello di illuminazione di Phong: componente speculare: spiegazione intuitiva

- ✓ Il modello di Phong somma alla componente di riflesso **diffusiva** (quella già discussa) una componente di riflesso **speculare**, che sarà tanto maggiore tanto più la direzione di vista $\vec{\omega}_r$ sarà simile alla direzione di luce riflessa \vec{R}



70

Modello di illuminazione di Phong: componente speculare: un calcolo preliminare

calcolo di \vec{R} a partire da $\vec{\omega}_i$ e \vec{n} (vedi lez algebra punti e vettori)

$$\vec{R} = -\vec{\omega}_i + 2 (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) \vec{n}$$

71

Modello di illuminazione di Phong: componente speculare: calcolo

Prodotto dot, ma 0 se negativo. Misura la similarità fra le due direzioni!

“Specular exponent” o “shininess” (vedi lucido successivo)

Intensità della luce (RGB)

$$(\vec{\omega}_r \cdot \vec{R})^s \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix}$$

intensità e colore RGB degli highlights, scelto a piacere per un dato materiale

72

Modello di illuminazione di Phong: shininess (o specular exponent)

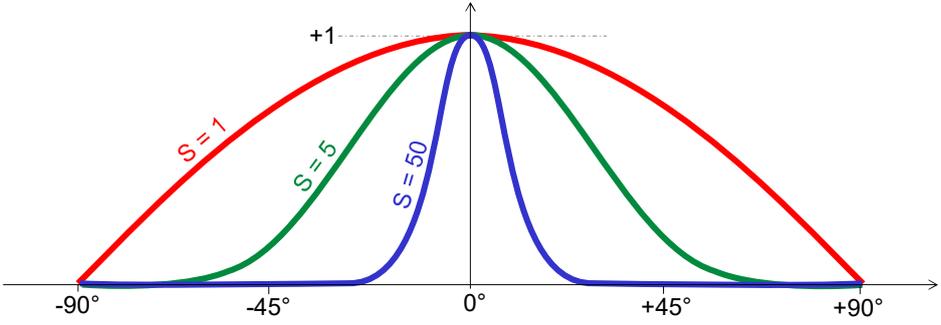
- ✓ La formula $(\vec{\omega}_r \cdot \vec{R})^S$ (fra 1 e 0) produrrebbe riflessi troppo grandi, perché decresce troppo lentamente al discostarsi di $\vec{\omega}_r$ da \vec{R}
- ✓ Per ovviare, basta elevare ad una potenza $S > 1$
 - ⇒ Elevando un numero minore di 1 ad un a $S > 1$, lo si avvicina allo 0
- ✓ Il fattore S è detto specular exponent, o shininess, o glossiness.
 - ⇒ Possiamo scegliere ad esempio valori come 1, 10, 100, o 1000
- ✓ Tanto maggiore vale S , tanto più simile dovranno essere $\vec{\omega}_r$ e \vec{R} per avere un riflesso visibile, cioè tanto più piccoli e concentrati saranno gli *highlights*.
 - ⇒ Nuovamente, questo passaggio non ha nessun preciso significato fisico, ed è solo un espediente matematico usato per ottenere l'effetto desiderato (in modo controllabile tramite il parametro S)



73

Componente riflessione speculare

- ✓ Elevando il coefficiente ad una potenza $S > 1$, si ottengono highlights più piccoli e concentrati

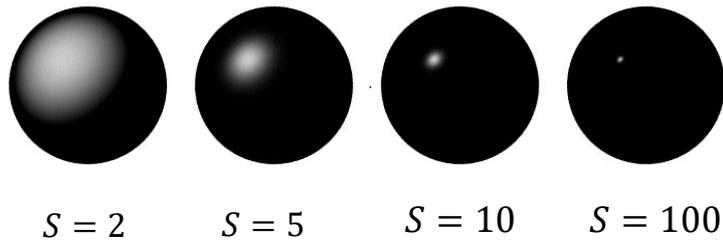


angolo fra $\vec{\omega}_r$ e \vec{R}



75

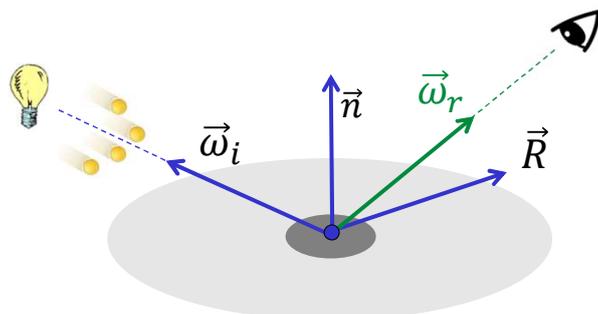
Effetto della scelta dello specular exponent



76

Calcolo della componente speculare con Blinn-Phong 1/2

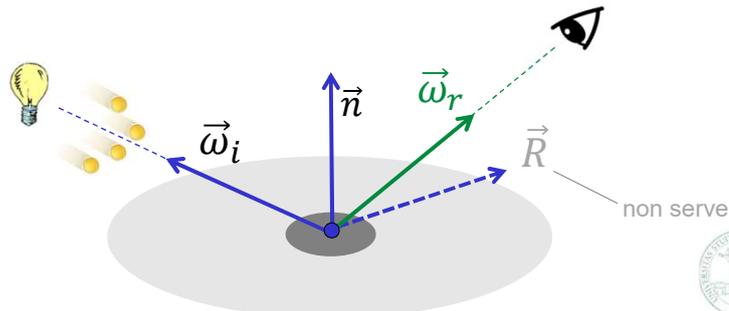
- ✓ Blinn-Phong è una variante (quasi equivalente) per calcolare la similarità fra $\vec{\omega}_r$ e \vec{R} senza dover calcolare esplicitamente \vec{R}
- ✓ Intuizione: $\vec{\omega}_r$ coincide con \vec{R} **sse** la normale \vec{n} è esattamente a metà strada dei due vettori $\vec{\omega}_r$ e $\vec{\omega}_i$ (verifica in un disegno!)



77

Calcolo della componente speculare con Blinn-Phong 2/2

- ✓ Invece che calcolare \vec{R} (a partire da $\vec{\omega}_i$ e \vec{n}) e poi chiedersi quanto sia simile a $\vec{\omega}_r$, la formula Blinn-Phong calcola la direzione intermedia fra $\vec{\omega}_i$ e $\vec{\omega}_r$ (dir di illuminaz e dir di vista), detta **half-way vector**, e si chiede quanto questa sia simile ad \vec{n}
- ✓ Questo produce un risultato molto simile ma meno oneroso calcolare



81

Modello di illuminazione di Blinn-Phong: componente speculare: calcolo

Prodotto dot, ma 0 se negativo. Misura la similarità fra i due vettori

Half-way vector: la media (rinormalizzata) fra direzione di vista e direzione di luce

Intensità della luce (RGB)

$$(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_h)^s \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix}$$

intensità e colore RGB degli highlights, scelto a piacere per un dato materiale

Specular exponent o shininess (come in precedenza)

82

Modello di illuminazione di Phong: in totale (per ogni luce)

✓ Il modello di illuminazione di Phong aggiunge, (per ogni luce) alla componente diffusiva (di Lambert) la componente Speculare (qui, calcolata con Blinn-Phong)

$$\begin{pmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{pmatrix} = (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i) \begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_h)^S \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix}$$

Half-way vector $\vec{\omega}_h = \frac{\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_r}{\|\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_r\|}$

83

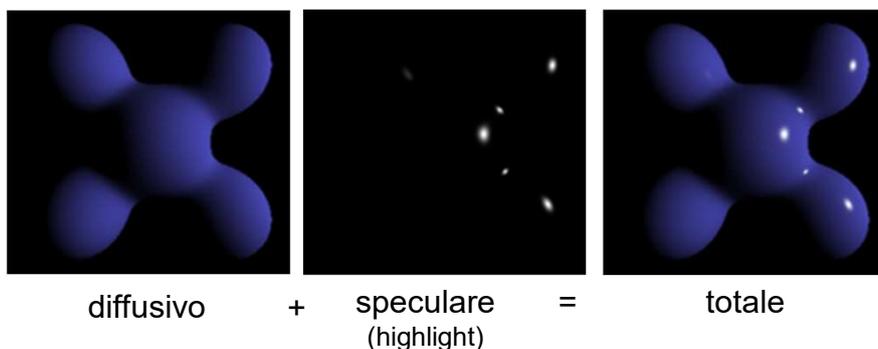
Modello di illuminazione di Phong: riassunto degli input del calcolo

- ✓ la direzione di luce $\vec{\omega}_i$ è un modello *view-dependent* !
- ✓ la direzione di vista $\vec{\omega}_r$
- ✓ Intensità/colore della luce $\begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix}$
- ✓ Base-color o diffuse-color $\begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix}$ «di che colore è» l'oggetto
- ✓ Intensità/colore degli highlights $\begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix}$ Nuove caratteristiche del materiale scegliibili a piacere, che concorrono a differenziare un materiale da un altro
- «quanto sono intensi / di che colore sono i riflessi»
- ✓ Esponente di specularità, o shininess, o glossiness S «quanto sono piccoli i riflessi»

85

Modello di Phong

Il risultato finale è ottenuto sommando al termine diffusivo (di Lambert) il nuovo componente speculare (gli highlight)



86

Sperimentiamo il modello di lighting Phong con three.js (note)

- ✓ 1: costruiamo il materiale di tipo Phong

```
var mioMat = new THREE.MeshPhongMaterial();
```
- ✓ 2: come quello di Lambert, questo materiale prevede un colore base (o diffuse color) – tripletta di numeri da 0 a 1

```
mioMat.color.setRGB( ... , ... , ... );
```
- ✓ 3: il materiale di Phong prevede anche il colore speculare (colore e intensità degli highlights)

```
mioMat.specular.setRGB( ... , ... , ... );
```


e un esponente di Phong, chiamato da Three.js “shininess”

```
mioMat.shininess = 100;
```

Nota: three.js riduce automaticamente lo specular per compensare l'esponente
esponente basso => highlights grandi => highlight meno intensi,
esponente alto => highlights piccoli => highlight più intensi

Vedere il progetto [lab07.html](#)



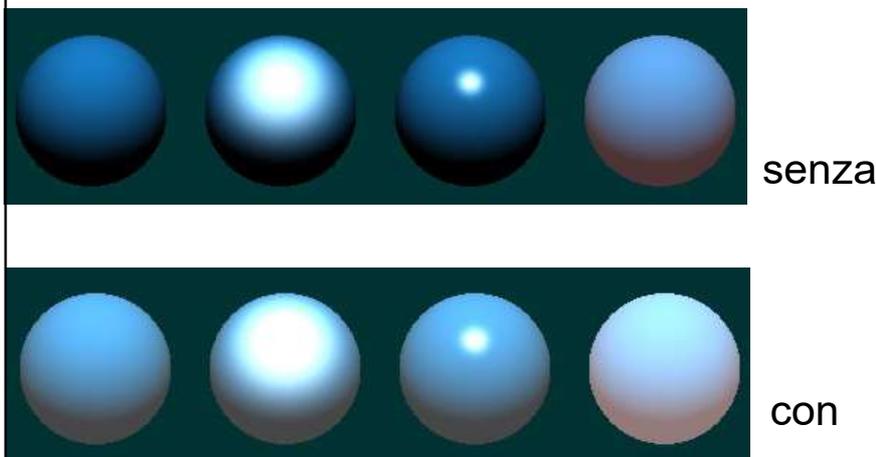
87

Luce ambientale

- ✓ Un problema del modello di illuminazione visto è che le superfici non raggiunte da alcuna luce (cioè, quelli in cui siano negativi i prodotti dot fra normale e dir. luce, e fra normale e half-way dir) sono perfettamente neri
- ✓ In una scena realistica, questo è un caso molto raro. Nella maggior parte dei casi, si può assumere che un minimo di luce (detta «ambientale») *raggiunga qualsiasi superficie, da qualsiasi direzione*
- ✓ Per simulare questo stato di cose, si può semplicemente aggiungere al modello di illuminazione una componente ambient, una piccola costante additiva (in R, G e B) data dell'intensità di una apposita fonte luce di tipo detto «ambientale» (una luce pervasiva, globale, che non ha né una direzione, né posizione)
- ✓ Nota che questo piccolo bonus di luce non dipende né dalla posizione del punto illuminato né dal suo orientamento (la sua normale)
- ✓ La componente ambient è data dal prodotto componente per componente l'intensità/colore della luce ambient e un parametro del materiale detto «ambient color» («di che colore appare questo oggetto sotto la luce ambientale?»). Spesso (sempre, in three.js) questo coincide col diffuse color

89

Componente *ambiente*



91

Modello di phong: esempio (con una luce sola direzionale, e una ambientale)

Il risultato finale è ottenuto sommando tutti i termini

ambiente + diffusivo + speculare (highlights) = totale

92

Aggiungiamo la componente ambient in three.js (note)

- ✓ creiamo una sorgente di luce ambient (tenue, e incolore: R = G = B = 0.1) e aggiungiamola alla scena

```
var luceAmbiente = new THREE.AmbientLight();  
var luceAmbiente.setRGB( 0.1, 0.1, 0.1 );  
miaScena.add(luceAmbiente);
```

Vedere lez07.html per un esempio

93

Modello di illuminazione detto di Phong

✓ Modello di illuminazione risultante (per una luce)

da ripetere e sommare per ciascuna luce direzionale o posizionale

per la luce ambient

termine diffusivo

termine speculare

termine ambient

$$\begin{pmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{pmatrix} = \underbrace{(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}_{\substack{\text{coefficiente} \\ \text{diffusivo} \\ \text{da 0 a 1} \\ \text{(0 se neg)}}} \begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + \underbrace{(\vec{n} \cdot \vec{h})^s}_{\substack{\text{coefficiente} \\ \text{speculare} \\ \text{da 0 a 1} \\ \text{(0 se neg)}}} \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix}$$

↑
 colore pixel finale

94

Modello di illuminazione detto di Phong: sommario

✓ Modello di illuminazione risultante (qui, per una luce):
parametri che dipendono dall'**ambiente di illuminazione**

direzione della luce i -esima
 (costante per le luci direzionali,
 diversa per ogni punto nelle luci posizionali)

direzione di vista
 (costante con proiezione
 ortografica,
 diversa per ogni punto
 per proiezione prospettica)

$$\begin{pmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{pmatrix} = (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i) \begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + (\vec{n} \cdot \vec{h})^s \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_{aR} \\ L_{aG} \\ L_{aB} \end{pmatrix}$$

↑
 intensità & colore della luce i -esima
 (costante per luci direzionali,
 soggette ad attenuazione per luci pos)

↑
 intensità & colore della luce ambient

95

Modello di illuminazione detto di Phong: sommario

✓ Modello di illuminazione risultante (qui, per una luce):
 parametri che costituiscono la descrizione del **materiale**

diffuse color
o
base color

specular exponent
(o shininess)

highlight color
(o specular color)

ambient color
(spesso, lo stesso
del diffuse color)

$$\begin{pmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{pmatrix} = (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i) \begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + (\vec{n} \cdot \vec{h})^s \begin{pmatrix} H_R \\ H_G \\ H_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_{aR} \\ L_{aG} \\ L_{aB} \end{pmatrix}$$


96

Definizione dei materiali

- ✓ Il modello di lighting adottato determina quale insieme di parametri descriva un **materiale**
- ✓ Nel modello visto (modello di Phong) un **materiale** è descritto da questi parametri:
 - ⇒ Il **colore diffusivo**
 - ⇒ Il **colore ambient**
(a volte corrispondente al colore diffusivo)
 - ⇒ Il **colore speculare**
 - ⇒ Lo **specular coefficient**
(un numero da 1 a, per es, 1000)
- ✓ La scelta di un qualsiasi materiale (velluto, oro, etc) si effettua spaziando fra i possibili valori da assegnare a queste variabili
- ✓ E' possibile scegliere questi parametri "a mano",
(ad esempio, da parte di artisti addetti al task, detti *material artists*)
o anche catturarli da campioni di materiale reale
(con acquisizioni fotografiche, seguite da un fitting di parametri)



97

Esempi di materiali (col modello Phong)

Material	GL_AMBIENT	GL_DIFFUSE	GL_SPECULAR	GL_SHININESS
Emerald	0.0216	0.07568	0.033	70.8
	0.1746	0.01424	0.727611	
	0.0216	0.07568	0.033	
	0.55	0.55	0.55	
Jade	0.135	0.54	0.316228	12.8
	0.2225	0.89	0.316228	
	0.1676	0.83	0.316228	
	0.95	0.95	0.95	
Obsidian	0.05375	0.18275	0.332741	39.4
	0.05	0.17	0.328634	
	0.08025	0.22625	0.348435	
	0.92	0.82	0.82	
Pearl	0.25	1.0	0.206048	11.204
	0.20725	0.829	0.206048	
	0.20725	0.929	0.206048	
	0.922	0.922	0.922	
Ruby	0.1746	0.01424	0.727611	70.8
	0.01175	0.04138	0.626659	
	0.01175	0.04138	0.626659	
	0.55	0.55	0.55	
Turquoise	0.1	0.309	0.297254	12.8
	0.18725	0.74151	0.30029	
	0.1746	0.59102	0.306678	
	0.8	0.8	0.8	
Black Plastic	0.0	0.01	0.60	32
	0.0	0.01	0.60	
	0.0	0.01	0.60	
	1.0	1.0	1.0	
Black Rubber	0.02	0.01	0.4	10
	0.02	0.01	0.4	
	0.02	0.01	0.4	
	1.0	1.0	1.0	
Brass	0.328412	0.780392	0.992157	27.8974
	0.32509	0.698027	0.911176	
	0.027461	0.113725	0.807943	
	1.0	1.0	1.0	
Bronze	0.2125	0.714	0.392646	25.0
	0.1275	0.4284	0.271005	
	0.054	0.16144	0.188721	
	1.0	1.0	1.0	
Polished Bronze	0.25	0.4	0.774697	70.8
	0.148	0.2308	0.465601	
	0.06475	0.1036	0.200621	
	1.0	1.0	1.0	
Chrome	0.25	0.4	0.774697	70.8
	0.25	0.4	0.774697	
	0.25	0.4	0.774697	
	1.0	1.0	1.0	

98

Alcune note sui limiti dell'equazione di Phong

- ✓ Questa lezione ha mostrato una visione semplificata del problema del lighting
- ✓ Il **modello di Phong**, adottato da molti decenni (con poche varianti) per il rendering real-time, è pensato per efficienza (richiede pochi calcoli), *ma* riproduce un range di materiali (cioè **BRDF**) molto limitato ed è un'approssimazione molto cruda di materiali reali
 - ⇒ Molte BRDF di materiali reali non possono essere ben approssimate da nessuna scelta dei parametri del modello di Phong
 - ⇒ Molte delle BRDF risultanti da una scelta arbitraria dei parametri non sono realistiche (secondo criteri di qualità attuali della CG). Per es, la BRDF non è *energy preserving* (un oggetto può riflettere più luce, in totale, di quella ricevuta)
- ✓ Equazioni di illuminazione più onerose riducono questi problemi: prevedono l'uso di materiali più espressivi, e rendono più facile e intuitiva la scelta di parametri atti a riprodurre materiali reali (dato che sono pensate in modo perché quasi tutte le combinazioni dei parametri del materiale risultano in BRDF realistiche).
- ✓ Anche la descrizione dell'**ambiente di illuminazione** prevista dall'equazione vista (cioè, un set di luci direzionali / posizionali, più una luce ambientale) è una semplificazione che non consente di riprodurre fedelmente ambienti complessi
- ✓ In molti contesti di CG (ad esempio videogames), è stata effettuata una transizione a modelli di illuminazione (e quindi di descrizione di materiali, e ambienti di illuminazione) più sofisticata del modello di Phong

99