

Marco Tarini - Computer Graphics 2019/2020
Università degli Studi di Milano

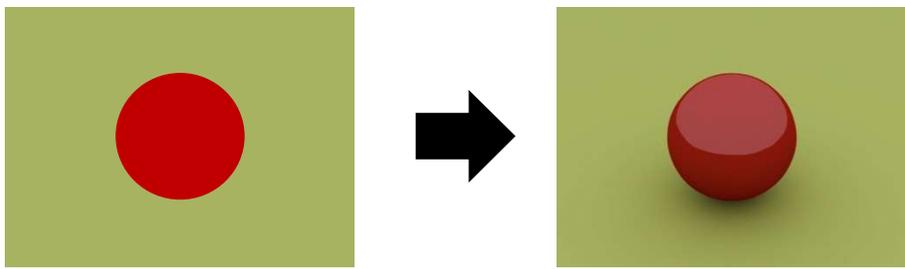
lighting ... in tempo reale



TELEDIDATTICA!

9

Lighting



10

Lighting: intro

- ✓ L'altra metà del rendering
- ✓ Determinare la luce
 - ⇒ quanta luce
 - ⇒ di che coloreche arriva
 - ⇒ da un punto della scena
 - ⇒ all'occhio
- ✓ Problema complesso...



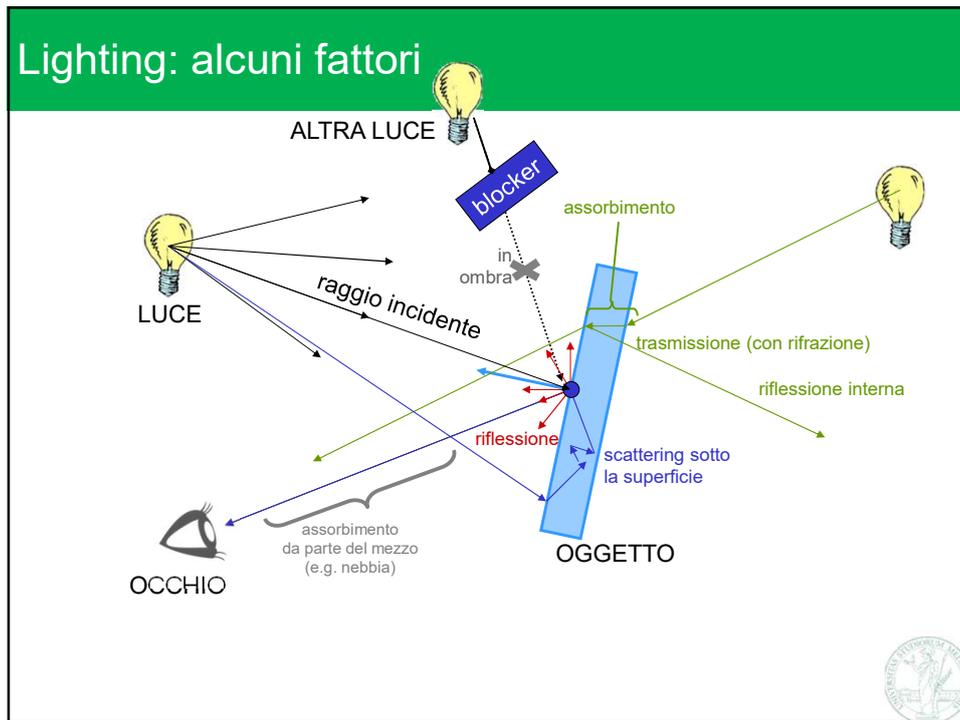
11

Lighting: intro

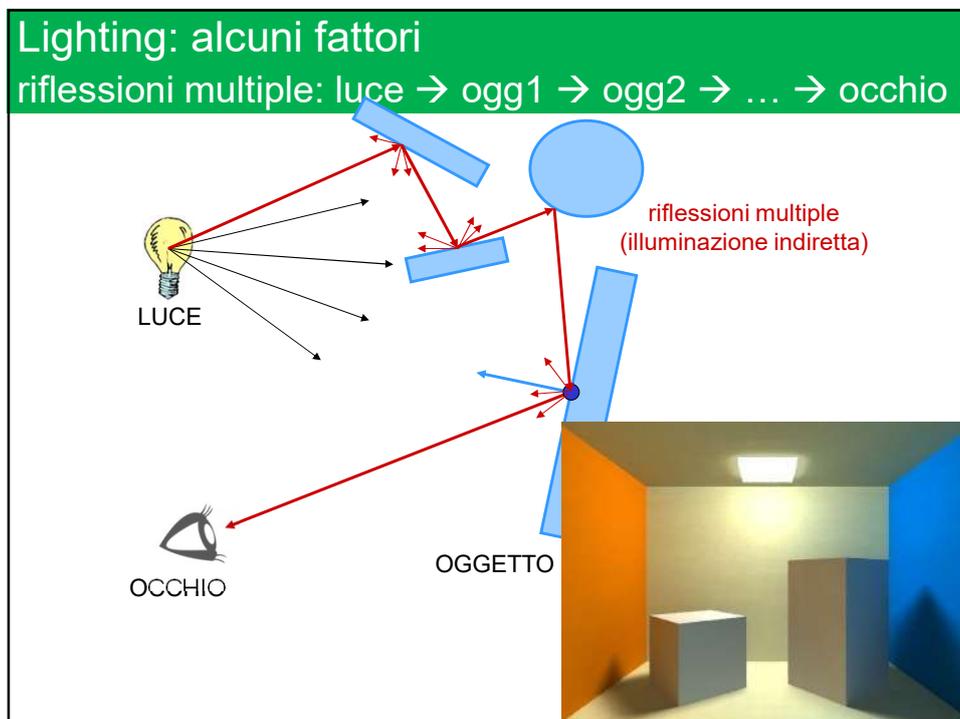
- ✓ Output:
 - ⇒ colore percepito per un dato punto
- ✓ Input:
 - ⇒ caratteristiche dell'oggetto illuminato ("**materiale**")
 - (es: carta bagnata, plastica ruvida, ...)
 - (o banalmente, «di che colore è» - vedi poi)
 - ⇒ caratteristiche della **luce** che illumina
 - (dove sono le fonti, che intensità / colore hanno)
 - ⇒ e **forma** degli oggetti / della scena
 - soprattutto, orientamenti delle superfici, cioè le normali



12



13



14

Lighting: globale VS locale

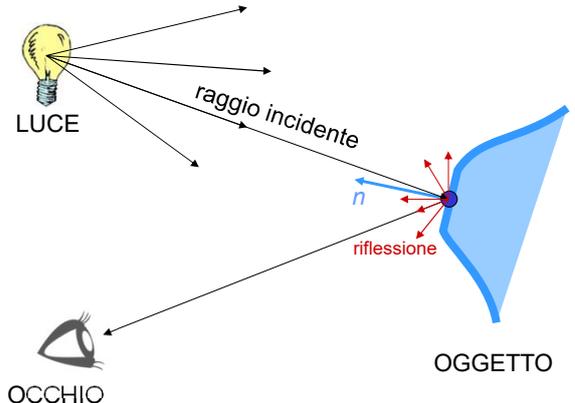
illuminazione locale	illuminazione globale
	<ul style="list-style-type: none">⇒ riflessioni multiple⇒ ombre⇒ scattering sottosuperficiale⇒ rifrazione⇒ ...

torna molto più facile da fare con il nostro Hardware



15

Lighting locale: emitter → oggetto → occhio (e nient'altro!)



LUCE

OGGETTO

OCCHIO

raggio incidente

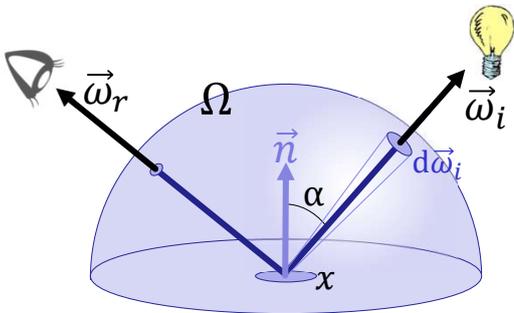
n

riflessione



16

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza



$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) \cos(\alpha) d\vec{\omega}_i$$

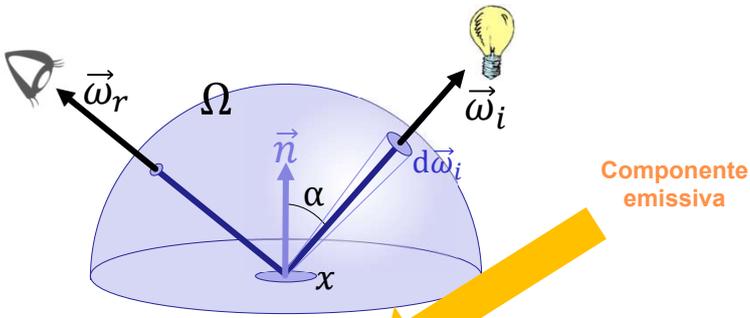
17

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza [simboli]

- x punto sulla superficie da illuminare;
- $\vec{\omega}_r$ direzione da x verso la posizione dell'osservatore
- $\vec{\omega}_i$ direzione da cui proviene il raggio di luce incidente
- $L_i(x, \vec{\omega}_i)$ quantità di luce incidente:
 luce esterna che raggiunge x dalla dir w_i
- $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$ coseno dell'angolo di incidenza rispetto alla normale
 alla superficie (vedi dopo)
- Ω dominio di tutte le direzioni possibili
 (cioè tutte i vettori normalizzati... che arrivano da davanti)
 (cioè la sup. della semi-sfera unitaria)

18

Lighting locale più in generale possibile:
l'equazione della radianza



$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

Componente emissiva

19

Componente emissiva

- ✓ Usata solo per quei pochi materiali che emettono luce propria
 - ⇒ modella solo il percorso: emitter → occhio (non emitter → oggetto → occhio)
 - ⇒ cioè la luce emessa non illumina nient'altro

20

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza

$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

21

Luce incidente

✓ Per ogni posizione x
 $L_i(x, \dots)$ modella
 la distribuz di luce incidente

$L_i(x, \vec{\omega}_i)$ = quanta luce arriva addosso ad x dalla direzione $\vec{\omega}_i$

Modella gli ambienti di illuminazione possibili. Es:

- stanza con finestra aperta
- giornata di sole
- giornata coperta
- una discoteca

Cioè (nella metafora dei lucidi successivi) quante "palle da tennis" arrivano ad x da ciascuna direzione!

22

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza

$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

23

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza [parametri]

$f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$ funzione che determina la frazione di luce incidente che viene riflessa nelle varie direzioni (risponde a: "*quanta della luce che arriva in x dalla dir w_i sarà riflessa proprio verso w_r ?*")

- ✓ E' la funzione che descrive il materiale dell'oggetto
 ⇒ e la sua distribuzione sulla superficie
- ✓ Se è costante in $x \Rightarrow$ materiale uniforme:
 - ⇒ stesso materiale in ogni punto
 - ⇒ la funz (senza il 1mo parametro) prende nome di **BRDF** di quel materiale
 - ⇒ **BRDF** = Bidirectional Reflectance Distribution Function)
 - descrive le proprietà ottiche del materiale (per es: se è lucido, se ha riflessi porpora, se è opaco, o cangiante – come il velluto, o metallico, cromato... etc, etc)

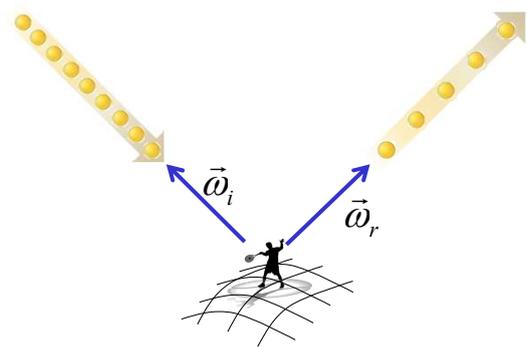
24

La BRDF di un materiale

$f_r =$ 
 fotone = 

$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) =$

su 100  che arrivano a 
 dalla dir $\vec{\omega}_i$,
 quante verranno da lui rimbalzate
 proprio nella dir $\vec{\omega}_r$?
 (al variare di $\vec{\omega}_i$ e $\vec{\omega}_r$)



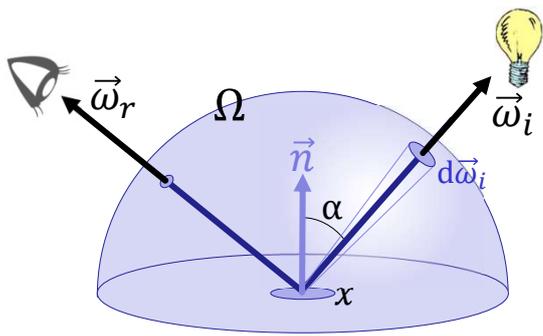
Ogni materiale, la sua BRDF:

- metallo cromato
- raso
- legno
- stoffa
- gesso
- carta
- specchio...

Funzione di 4 dimensioni!
(una direzione = 2 dimensioni)

25

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

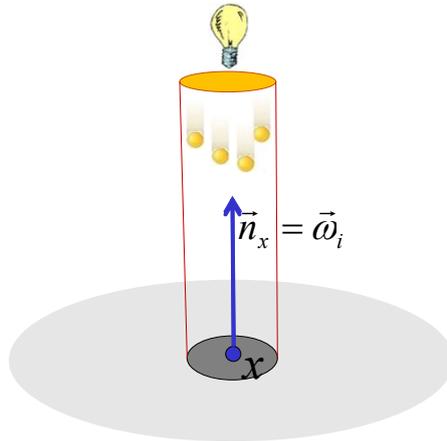
legge del coseno



26

Sottoproblema

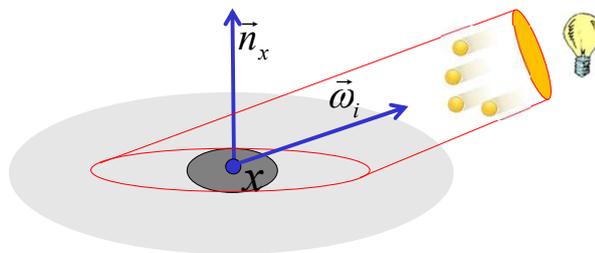
- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"):
quante ne riceve un intorno di x ?



27

Sottoproblema

- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"):
quante ne riceve un intorno di x ?



29

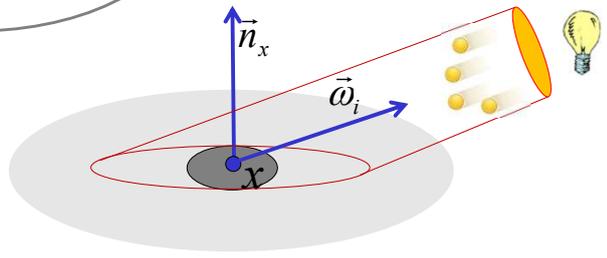
Sottoproblema

✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"):
 quante ne riceve un intorno di x ?

Soluz: $\cos(\alpha)L$
 $= (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})L$
 "La legge del coseno"



Johann
Heinrich
Lambert
1728 - 1777



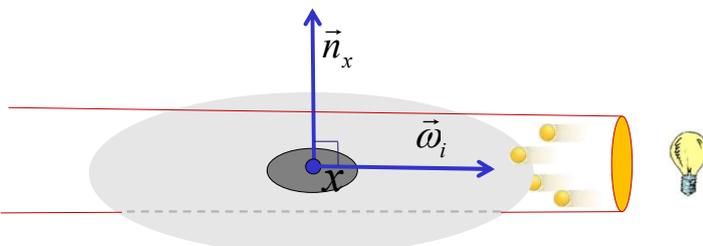

30

Sottoproblema

✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"):
 quante ne riceve un intorno di x ?

Luce perfettamente
 radente: $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) = 0$

infatti
 nessun fotone colpisce l'intorno!



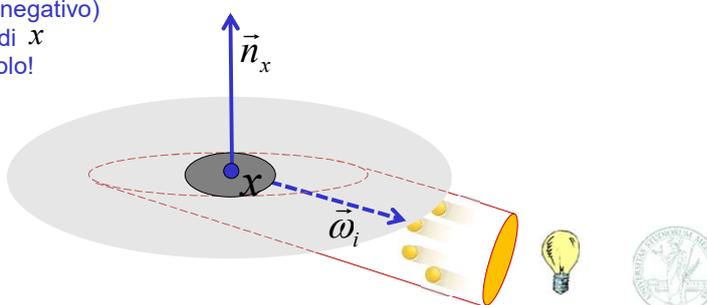

31

Sottoproblema

✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?

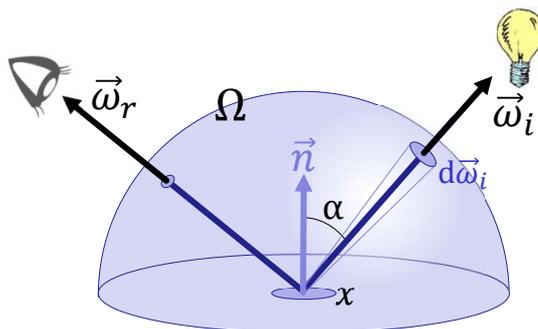
Luce da dietro: $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) < 0$

risposta: 0
 (non un numero negativo)
 Perché l'intorno di x
 si fa ombra da solo!



32

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



$\cos(\theta)$
 (ma
 0 se
 negativo)

$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

33

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza (sommario)

$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

“La luce che riceviamo da un punto x della scena è data dalla somma della luce *emessa* (da quel punto) più la luce *riflessa* (da quel punto)”

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} \overbrace{f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)}^{(C)} \overbrace{L_i(x, \vec{\omega}_i)}^{(A)} \overbrace{(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})}^{(B)} \overbrace{d\vec{\omega}_i}^{(D)}$$

“La luce riflessa è calcolata come la somma (nel continuo: l'integrale) dei contributi di tutte le sorgenti luminose presenti nella scena (una potenziale sorgente da ogni direzione)”

Per ogni direzione, il contributo è dato dal prodotto di:

(A)-(D) quanta luce proviene da quella direzione (**ambiente di illuminazione**)

(B) di questa, quanta ne riceve l'intorno di x (**legge del coseno**)

(C) di questa, quanta ne viene riflessa verso l'osservatore (dal **materiale**)



34

Equazione di lighting

- ✓ L'equazione della radianza costituisce un'equazione (o modello) di rendering molto accurato
 - ⇒ Il **materiale** è espresso da una **BRDF** e può essere molto accurato
 - ⇒ Es. BRDF catturati dal vivo oppure computati da funzioni anche complesse
- ✓ E' ottima per un rendering offline.
- ✓ Tuttavia, è troppo onerosa per un rendering real time
- ✓ Vediamo alcune drastiche semplificazioni possibili



35

**Semplificazione N 1:
 ambiente di luce discreto (e semplificato)**

- ✓ Invece di $L_i(x, \vec{\omega}_{incidente})$
- ✓ Ipotizziamo:
 - ⇒ ogni punto del modello riceve la **stessa** luce
 - (x sparisce dall'equazione)
 - ⇒ Arriva luce >0 solo da un piccolo numero N discreto di direzioni $\vec{\omega}_0, \vec{\omega}_1, \dots, \vec{\omega}_{N-1}$
 - anche 1 sola (cioè $N = 1$)
 - dalle altre dir, non arriva alcuna luce
 - l'integrale diventa una (piccola) sommatoria (su N)
 - un addendo per ogni luce considerata (anche solo 1)



36

**Semplificazione N 1:
 ambiente di luce discreto (e semplificato)**

- ✓ Da: integrale (su tutte le dir ingresso luci continue)

$$\int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} \dots \cdot L_i(x, \vec{\omega}_i) \cdot \dots d\vec{\omega}_i$$
- ✓ a: sommatoria (di poche luci discrete, o anche 1!)

$$\sum_{i=0}^{N-1} \dots \cdot L_i \cdot \dots$$

← intensità (costante)
della luce i-esima
- ✓ Per luci colorate, valori di intensità luce per r,g,b:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \dots \cdot \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} \cdot \dots$$

← intensità e colore
(costanti)
della luce i-esima



37

Lighting locale più in generale possibile:
 l'equazione della radianza

intensità e colore (costanti!) della luce i-esima

direzione di arrivo (incidente) della luce i-esima

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \sum_{i=0}^{N-1} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

38

Semplificazione N 2 :
 materiale più semplice possibile

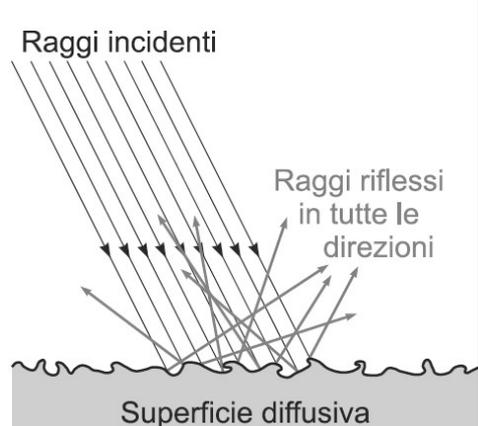
- ✓ BRDF *costante*
 - ⇒ non dipende da dir di arrivo della luce
 - ⇒ non dipende da dir di osservazione (è «view-independent»)
- ✓ Metafora: tennista completamente caotico
 - ⇒ rimbalza i fotoni in una direzione (statisticamente) a caso, indipendentemente dalla dir di arrivo
- ✓ Esistono materiali **reali** che si comportano davvero così?
 - ⇒ Sì: es. gesso e plastica ruvida
 - ⇒ Materiali completamente opachi, non lucidi, senza riflessi
 - ⇒ Detti: materiali «(puramente) diffusivi» o «(puramente) Lambertiani»

opaco in [ita] significa anche "non trasparente".
 In [eng]:
 dull = not shiny (not glossy)
 opaque = not transparent

39

Semplificazione N 2 : materiale più semplice possibile («lambertiano»)

- ✓ Succede quando...
 - ⇒ a livello microscopico...
la superficie presenta micro-sfaccettature disposte in modo caotico
- ✓ Nota:
 - ⇒ le BRDF dei materiali conseguono dalle configurazioni microscopiche (e, dalle loro proprietà elettromagnetiche)



Raggi incidenti

Raggi riflessi in tutte le direzioni

Superficie diffusiva



40

Semplificazione N 2 : materiale più semplice possibile («lambertiano»)

- ✓ Da funzione (della direz di ingresso e di uscita della luce)

$$\sum_{i=0}^{N-1} \dots \cdot f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \cdot \dots$$
- ✓ a costante, detta albedo

$$\sum_{i=0}^{N-1} \dots \cdot B_x \cdot \dots$$

← **albedo (del punto x):**
rapporto fra luce incidente e luce riflessa (da x).
- ✓ Per materiali colorati, 3 costanti, per R,G,B rispett.:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \dots \cdot \begin{pmatrix} D_x^R \\ D_x^G \\ D_x^B \end{pmatrix} \cdot \dots$$

← **base color o diffuse color (del punto x)**



41

Albedo e base color

- ✓ Un materiale puramente diffusivo (o Lambertiano) è descritto da un unico parametro
 - ⇒ **Albedo** – se non ci interessano i colori
 - ⇒ **Base Color** (o *diffuse color*) – per rendering a colori
- ✓ Il **Diffuse Color** è la risposta intuitiva alla domanda « di che colore è questo materiale »
 - ⇒ Confronta: «di che colore lo percepisco», che dipende dalle condizioni di luce, dalle normali, etc.
 «Di notte tutti i gatti sono bigi »
- ✓ Come tutti i parametri che definiscono i materiali, **albedo** / **base color** possono essere: costanti per oggetto, attributi, varying...



42

Risultato di tutte le semplificazioni viste: una semplice *Lighting equation*

nota, i tre «pallini» che appaiono nell'equazione rappresentano prodotti diversi! quali?

diffuse, (prodotto dot) il fattore che da solo determina il "chiaroscuro" in questo modello di lighting

$$L_r = \sum_{i=0}^{N-1} \begin{pmatrix} D_x^R \\ D_x^G \\ D_x^B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} \cdot (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

sommatoria su tutte le luci (discrete)

«di che colore lo percepisco» (risultato del lighting)

base color - «di che colore è» (materiale, uno degli input del lighting)

Light color: di che colore è la luce i-esima (e di quale intensità)

43

Modelli (o equazioni) di lighting

- ✓ L'equazione di lighting vista è molto semplice
 - ⇒ consiste esclusivamente di una componente di riflessione diffusa
 - ⇒ prevede materiali altrettanto semplici, descritti esclusivamente dal base color
 - ⇒ però è physically based – il fenomeno ottico modellato è accuratamente riprodotto (eccetto che per la tricromia RGB)
- ✓ E' un esempio di modello di illuminazione locale
- ✓ Il questo modello:
 - ⇒ il «materiale» è descritto unicamente dal base color (detto anche diffuse color)
 - ⇒ le luci sono discrete, e descritte da una direzione e una intensità (per canale R,G,B)
 - ⇒ L'unico aspetto geometrico che è rilevante è la normale del punto illuminato. In particolare, la direzione di osservazione non conta. È un modello «view independent».



44

Modelli (o equazioni) di lighting

- ✓ Vediamo la prossima lezione una eq solo leggermente più complicata (quella “storica” di OpenGL) che include anche:
 - ⇒ una componente ambient
 - modella (approssimando brutalmente) effetti di lighting globale
 - ⇒ una componente di riflessione speculare
 - modella (approssimando molto) BRDF non Lambertiane (x materiali lucidi)
 - ⇒ una componente di luce emissiva
 - per la luce emissiva, quasi mai utile ma costa poco



45